

Пропускателна способност на кръговите кръстовища – определение, изчислителни методи и приложение. Вариант за кръгово кръстовище на пл. „Македония”, гр.София

автор: инж. Огнян Ников



фиг. 1 – Кръговото кръстовище може да бъде разглеждано като серия от близко разположени „Т”-кръстовища

Capacity of Roundabouts. Proposal for roundabout scheme at Makedonia Square, Sofia

During the process for designing roundabouts road engineers should consider the most appropriate schemes for given location. Using capacity analyses as performance measure they can easily estimate different design decisions and achieve best practical solutions. Several methodologies for calculating capacity of modern roundabouts have been developed and already implemented as standard procedures in many countries. In this article the autor will try to describe and explain the most important definitions and procedures for estimating roundabout capacity.

Първата стъпка при разрешаването на даден транспортен проблем представлява избора на най-подходящата пътно-транспортна схема, която би удовлетворила в максимална степен изискванията за безопасност, експлоатационни характеристики, минимални разходи за строителство и поддръжка. Изработването, съпоставянето и сравнението на различни варианти улеснява пътните инженери при избора им и същевременно конкретизира предимствата и недостатъците на всяко едно от разработените решения.

Както описах в брой 5/2007 г. на това списание, кръговите кръстовища с предимство за движещите се в кръга в много случаи могат успешно да конкурират както обикновени кръстовища, регулирани с пътни знаци, така и светлинно-сигнално регулирани. Някои от най-главните критерии, по които различните схеми за кръстовища биват сравнявани като варианти, са пропускателна способност, време за изчакване и задръжки, дължина на колони и ниво на безопасност.

В тази статия ще се опитам да конкретизирам и разясня най-важните понятия и принципи, залегнали в основата за определяне на пропускателната способност на кръгови кръстовища с предимство за кръговото движение, включително и най-известните методики за изчисление, залегнали в стандартите за проектиране на различни страни в Европа и по света.

1. Същност на понятието „пропускателна способност”.

Под пропускателна способност (често наричана и „капацитет”) на кръгово кръстовище се разбира максималният брой превозни средства, които се очаква да навлязат от даден вход и се включат в кръговото движение, за определен период от време при конкретни пътни и климатични условия.

Теоретично кръговото кръстовище може да се разглежда като серия от близко разположени Т-кръстовища, с едно общо еднопосочно главно направление – платното за кръгово движение, и последователни второстепенни направления – входящите и изходящи клоновете на кръстовището – вж. фиг. 1. В такъв случай, когато се говори за пропускателна способност на кръгово кръстовище се има предвид сумарната стойност от пропускателната способност на всеки отделен вход.

2. Методи за определяне на пропускателната способност на кръговите кръстовища.

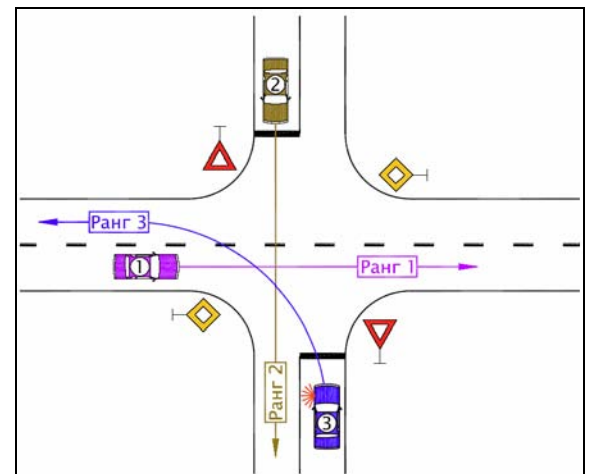
Пропускателната способност се определя в мястото на взаимодействие на входящите и циркулиращите транспортни потоци, т.е. линията за осигуряване на предимство. В стандартите за проектиране съществуват два основни метода за изчислението на капацитета – първият се основава на теорията за разпределение на „празните” интервали (засегната в известна степен в Нормите за проектиране на пътища [1], Приложение No. 14 към чл. 104), а вторият е на база емпирични зависимости – база се на резултати от изследване на голям брой съществуващи кръгови кръстовища.

3. Теория за разпределение на „празните” интервали – концепция.

При движението си превозните средства отстоят едно от друго на разстояния, характеризиращи се с времеви интервали Δt , [s]. Продължителността на тези интервали, техният брой и разпределението им във времето са предмет на изследване от теорията на „празните” интервали. Основните елементи на теорията са:

3.1. Йерархия на конфликтните транспортни потоци – Нека разгледаме общия случай на четириклонно кръстовище, регулирано с пътни знаци - вж. фиг. 2.

- Транспортен поток от Ранг 1 (главен) – притежава абсолютно предимство. Водачите от този ранг няма нужда да променят скоростта и поведението си под влияние на други транспортни потоци.
- Транспортен поток от Ранг 2 (подчинен) – водачите от този ранг са длъжни да осигурят предимство на всички превозни средства от Ранг 1.
- Транспортен поток от Ранг 3 (подчинен) – водачите от този ранг са длъжни да осигурят предимство на всички превозни средства от Ранг 2 и съответно на тези от Ранг 1.
- и т.н.

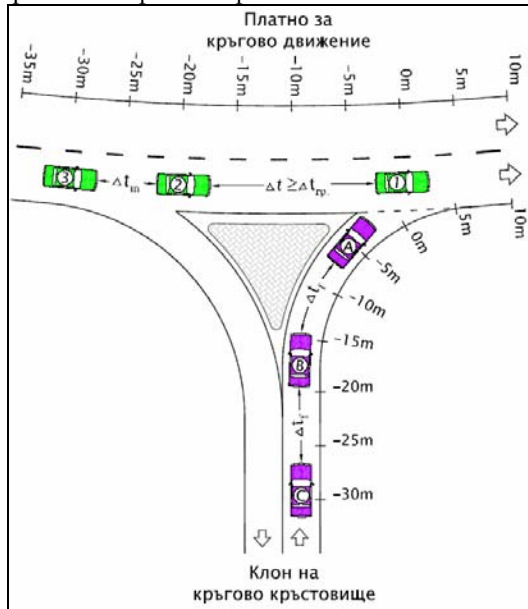


фиг. 2 – Йерархия в транспортните потоци – общ случай

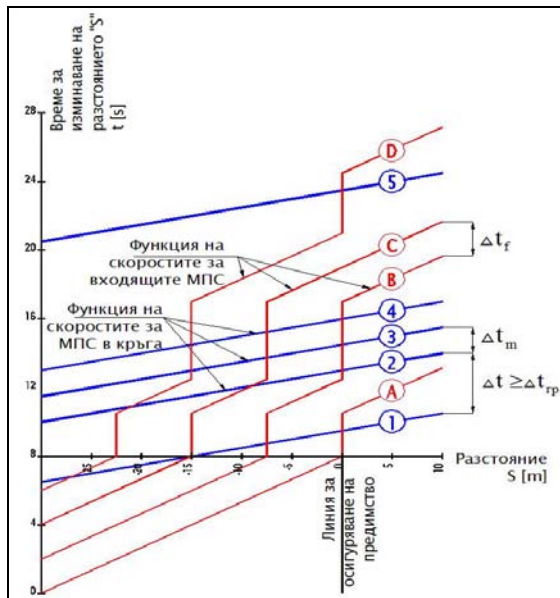
В теорията се допуска, че йерархията в транспортните потоци е осъзната и безусловно спазена от водачите. При кръговите кръстовища в частност съществува взаимодействие единствено между превозни средства от Ранг 1 и Ранг 2, т.е.

един главен поток в кръговото движение и един подчинен за всеки вход.

3.2. Граничен „празен“ интервал $\Delta t_{гр.}$ - всички „празни“ интервали, породени между превозните средства от главния поток и с продължителност $\Delta t \geq \Delta t_{гр.}$, ще бъдат използвани от превозните средства на подчинения поток за вливане, отливане и пресичане. При кръговите кръстовища водачите от входовете изчакват до момента на поява на „празен“ интервал $\Delta t \geq \Delta t_{гр.}$ между две последователни циркулиращи превозни средства и навлизат в кръга – вж. фиг. 3 и фиг. 4.



фиг. 3 – Пространствено разположение на превозните средства в кръговото кръстовище



фиг. 4 – Разпределение на времевите интервали според теорията на „празните“ интервали

3.3. Интервали на „следване“ Δt_f – когато между два автомобиля от главния поток се породи „празен“ интервал с по-голяма продължителност, тогава от подчинения поток навлизат няколко превозни средства през времеви интервали, наречени интервали на „следване“ Δt_f - вж. фиг. 3 и фиг. 4.

3.4. Интервали на дистанция Δt_m - В главния поток се наблюдават два типа превозни средства от гледна точка на взаимодействието между тях. Първият тип са т.нар.

„свободни“ автомобили – извършващи свободно движение, скоростта и маневрирането им не се влияе от останалите участници. Вторият тип са т.нар. „пакети“ – автомобили, движещи се в колона и на разстояние един от друг приблизително равно на безопасната дистанция. Това разстояние се характеризира с време, наречено интервал на дистанция Δt_m .

3.5. Неизменно и еднородно поведение на участниците в движението

- Неизменно поведение – при дадена ситуация се очаква водачът на отделно превозно средство да действа по един и същи начин при подобни пътни и климатични условия. В случая с кръговите кръстовища се очаква водач от даден вход винаги да спре и изчака при възникване на „празен“ интервал $\Delta t < \Delta t_{гр.}$ и винаги да навлиза при $\Delta t \geq \Delta t_{гр.}$.

- Еднородно поведение – очаква се всички водачи да реагират и действат по един и същи начин при дадена ситуация при подобни пътни и климатични условия.

4. Предимства и недостатъци на теорията.

4.1. Предимства:

- Представя относително реално както механизмите на взаимодействие между конфликтните транспортни потоци, така и действителното поведение на водачите.

- Главните параметри – празни интервали Δt [s] и интензивност Q [EA/h], участващи в определянето на пропускателната способност, могат да бъдат установени относително лесно чрез серия от експерименти.

- Лесно се преработва за различни условия, което я прави адаптируема към нормативите за проектиране на различни държави.

- Служи като основа за създаването на теоретичните модели при компютърно симулиране на движението.

4.2. Недостатъци:

- Главният недостатък на теорията е това, че е „пасивна“, т.е. приема, че водачите от главния поток не реагират на появата на превозни средства от второстепенното направление. Всъщност, трудно може да се каже дали „празните“ интервали Δt , породени в циркулация (главен) поток, се появяват по естествен начин или са породени и/или променени от входящия (подчинен) поток. На практика при кръговите кръстовища, в моменти на пикова интензивност и постоянно образуване на колони, се наблюдава промяна на поведението на водачите в кръга. Те са принудени да намалят скоростта си и дори да отстъпят предимството на входящите превозни средства. Този феномен на обрат в предимството на потоците се нарича „принудителен“ празен интервал [2] и оказва негативно влияние върху пропускателната способност най-вече на двулентови кръгови кръстовища.

5. Методи за определяне на пропускателната способност на база емпирични зависимости.

Методите са базирани на регресионни техники, анализиращи връзката между интензивностите на конфликтните транспортни потоци в зависимост от геометричните елементи на кръговото кръстовище. За постигане на представителност на резултатите от особена важност е количеството на събраните данни, тъй като регресията се основава на отчетени на място реални интензивности. Методиката на регресионния анализ може да се обясни най-общо така:

Разглеждат се равни по продължителност периоди на пикова интензивност, в които се наблюдава постоянно образуване на колони от превозни средства в подчинения поток – вход на кръговото кръстовище. Изследваните периоди се разделят на едноминутни интервали. Във всяка една от тези

минути се определя броят на циркулиращите и броят на навлезлите в кръга превозни средства от изследвания вход. Резултатите се нанасят в графика „Интензивност главен поток / Интензивност подчинен поток” и чрез регресионни техники се търси връзката между тях и влиянието на геометричните елементи.

6. Предимства и недостатъци на емпиричните методи [3].

6.1. Предимства:

- Отпада нуждата от създаване на теоретичен модел.
- Пропускателната способност е действително измерена на място.
- Влиянието на геометричните елементи може да се оцени непосредствено.
- Няма нужда да се анализира поведението на участниците в движението.

6.2. Недостатъци:

- Адаптирането на модела към нормативите за проектиране на различни държави е твърде ограничено поради това, че изследванията се правят за определена пътна конюнктура.
- Експлоатационните характеристики се отчитат в условия на претовареност на кръстовището, когато естественото поведение на водачите е променено под влияние на пиковата интензивност.
- Опитните данни могат да бъдат събирани само в периоди, в които се наблюдават постоянни колони от изчакващи превозни средства. Поради това не могат да бъдат изследвани кръстовища, които не оперират на границата на пропускателната си способност.
- Всяка ситуация, засегната и отчетена в модела, трябва да бъде оценена в реална обстановка. От една страна, това изисква огромни усилия и ресурси за събиране на данни. От друга, често е много трудно да се намерят кръгови кръстовища, работещи на предела на пропускателната си способност, тъй като голяма част от тях вече са с въведено светлинно-сигнално регулиране.

7. Методи за изчисление на пропускателната способност на кръгови кръстовища, залегнали в нормите за проектиране на различни държави.

7.1. Според теорията за разпределение на „празните” интервали:

7.1.1. Норми за проектиране на Австралия [4].

$$Q_e = \frac{3600(1-\theta)q_c e^{-\lambda(\Delta t_{кр} - \Delta t_m)}}{1 - e^{-\lambda \Delta t_f}}, \text{ където}$$

Q_e - Пропускателна способност на една лента от изследвания вход, [EA/h]

θ - Пропорционално участие на циркулиращи превозни средства, движещи се в „пакет”

q_c - Интензивност на главния поток по платното за кръгово движение, [EA/s]

$\Delta t_{кр}, \Delta t_m, \Delta t_f$ - вж. т. 1, [s]

λ - Коефициент на дисперсия, [EA/s]

7.1.2. Норми за проектиране на САЩ – засега адаптирана само за еднолентови кръгови кръстовища [5].

$$Q_e = \frac{q_c e^{\frac{q_c \Delta t_{кр}}{3600}}}{1 - e^{\frac{q_c \Delta t_f}{3600}}}, \text{ където}$$

$Q_e, q_c, \Delta t_{кр}, \Delta t_m, \Delta t_f$ - вж. т. 7.1.1

7.1.3. Норми за проектиране на Германия [6].

$$Q_e = 3600 \left(1 - \frac{\Delta t_m Q_c}{3600 n_k} \right)^{n_k} \frac{n_z}{\Delta t_f} e^{-\frac{Q_c}{3600} \left(\Delta t_{кр} - \frac{\Delta t_f}{2} - \Delta t_m \right)}, \text{ където}$$

$Q_e, \Delta t_{кр}, \Delta t_m, \Delta t_f$ - вж. т. 7.1.1

Q_c - Интензивност на главния поток по платното за кръгово движение, [EA/h]

n_k - Брой на лентите за движение по платното за кръгово движение, [бр.]

n_z - Коефициент в зависимост от броя на лентите за движение в изследвания вход, [бр.].

7.2. Методи на база емпирични зависимости.

7.2.1. Норми за проектиране на Великобритания [7].

$$Q_e = k(F - f_c Q_c), \text{ където}$$

k, F, f_c са коефициенти, зависещи от:

D - Диаметър на най-малката вписана в кръговото кръстовище окръжност [m]

ϕ - Ъгъл на вливане [градуси]

R_c - Радиус на най-малката бордюрна крива на изследвания вход [m]

e - Ширина на входа при линията за осигуряване на предимство [m]

v_e - Ширина на половин платно извън обсега на кръстовището [m]

l' - Дължина на ефективното уширение във входа [m]

7.2.2. Норми за проектиране на Франция и Белгия [8]

$$Q_{e,1} = 1500 - \frac{5}{6} Q_g$$

$$Q_{e,2} = 1.4 Q_{e,1}, \text{ където}$$

$$Q_g = \beta Q_c + \alpha Q_s$$

$Q_{e,1}$ - Пропускателна способност на еднолентов вход [EA/h]

$Q_{e,2}$ - Пропускателна способност на двулентов вход [EA/h]

Q_c - Интензивност на главния поток по платното за кръгово движение, [EA/h]

Q_s - Интензивност на изходящия поток в клона на изследвания вход [EA/h]

α, β - Коефициенти, отчитащи съответно ширината на разделителния остров и ширината на платното за кръгово движение

7.2.3. Норми за проектиране на Швейцария [9]

$$Q_e = k \left(1500 - \frac{8}{9} Q_g \right), \text{ където}$$

Q_g - вж. т. 7.2.2.

K - Коефициент, отчитащ броя на лентите в изследвания вход

7.2.4. Норми за проектиране в България [1].

Според сегашните норми за проектиране в България пропускателната способност на кръговите кръстовища зависи от зоните за преплитане, които се оразмеряват според методиката на Wardrop от 1957 г., която по-късно е доразвита и издадена като стандарт от Английската Пътна Лаборатория през 1965 г. [10].

$$N_{\max} = 258 \frac{b_{\text{препл.}} \left(1 + \frac{b_{\text{ср.}}}{b_{\text{препл.}}} \right)}{1 + \frac{b_{\text{препл.}}}{L_{\text{препл.}}}}, \text{ където}$$

N_{\max} - пропускателна способност на зоната за преплитане, [EA/h]

$b_{\text{препл.}}$ - ширина на настилката в зоната за преплитане [m]

$b_{\text{ср.}}$ - средна ширина на настилката на входовете (изходите) [m]

$L_{\text{препл.}}$ - дължина на зоната за преплитане [m]

Тази методика отразява тогавашните стандарти за проектиране на кръгови кръстовища със зони за преплитане и централен остров с голям радиус. В обясненията към методиката е подчертано, че входящото и циркулиращо движение са с равен приоритет, т.е. не се дава предимство за нито едно от направленията. По-късно, в средата на 70-те години, тази методика е отхвърлена [11] поради редица проблеми (ниска пропускателна способност, „блокиране” на кръстовищата – вж. брой 5/2007 г., висока аварийност и др.) и заменена с нова, основаваща се на линейната регресия и описана от мен в т. 7.2.1.

8. Площад „МАКЕДОНИЯ”, гр. София – идеен вариант за промяна на съществуващото светофарно-регулирано кръстовище в кръгово кръстовище с предимство за кръговото движение.

8.1. Съществуващо положение.

Кръстовището на пл. „Македония” в гр. София винаги е било място с трудно разрешими транспортни проблеми. То е възлова точка за автомобилен и трамваен транспорт, с многобройни преплитания на връзки и породените от това конфликти и висока интензивност на движението по всички направления. Правени са различни опити за въвеждане на подходяща организация на движението, като дори са предлагани решения за пресичане на различни нива. В момента кръстовището е светлинно-сигнално регулирано, с дължина на светофарния цикъл от 100 секунди, при 4 фази. От моите наблюдения по време на пиковите часове (и не само тогава!) установих, че кръстовището отдавна е изчерпило капацитета си. По бул. „Христо Ботев” и бул. „Македония” (вж. фиг. 5) се натрупват изчакващи автомобилни колони, които блокират както самите булеварди и напречните им улици, така и предишните кръстовища – едно светофарно-регулирано на пл. „Взраждане” и кръговото кръстовище при Руски паметник. Допълнителни трудности възникват от голямата интензивност на пешеходното движение и наличието на трамвайни спирки в подходите.



фиг. 5 – Съществуващо светлинно-сигнално регулирано кръстовище на пл. „Македония”, гр. София. Сложната геометрия и големият брой трамвайни връзки създават сериозни затруднения за движението.

8.2. Идеино решение за подобряване на организацията на движението чрез въвеждане на кръгово кръстовище.

При разработката на идейното решение си поставих няколко основни задачи, с разрешаването на които смятам, че ще се постигне едно общо подобрене както на експлоатационните характеристики на кръстовището, така и на безопасността на движението. Тези задачи са:

- Физическо разделяне на конфликтните потоци чрез въвеждане на разделителни острови.
- Трамвайното движение да бъде максимално улеснено и осигурено предимство пред останалите участници в движението.
- Обособяване на трамвайни спирки, отделени от платната за движение и повдигнати с бордюри.
- Улеснено и безопасно пешеходно пресичане чрез въвеждане на „спасителни” острови.



фиг. 6 – Идеен вариант за въвеждане на кръгово движение с цел подобряване на експлоатационните характеристики на кръстовището.

На фиг. 6 е показано идейното решение за кръговото кръстовище. Ключов елемент в разработката е формата на централния остров. Избрах правилен овал, изтеглен по направлението на бул. „Македония”, с радиус на централния остров $R=16\text{m}$. Избраната форма има две основни предимства – а) Трамвайните връзки се преплитат вътре в острова, без да пречат на циркулиращото движение и б) Има възможност за увеличаване радиуса на бордюрната крива между входящия

клон на бул. „Македония” и южния изходящ клон на бул. „Христо Ботев” до R=10 (12)m (в момента бордюрата крива е с радиус R=5.50m).

Организацията на движението е осъществена чрез съчетание на вертикална сигнализация и светлинно-сигнално регулиране по платното за кръгово движение. Всички циркулиращи МПС са с предимство пред входящите автомобили (във всеки входящ клон са поставени пътни знаци Б1 - „Пропусни движещите се по пътя с предимство!”), но са длъжни да осигурят предимство за трамвайното движение. За да се избегне объркването у водачите е въведена светофарна уредба, свързана с детектори в трамвайните релси. При приближаването на трамвайна мотриси светофарът светва червено за циркулиращите автомобили (вж. фиг. 7). След като трамваят напусне кръстовището, светофарите светват зелено и се възвръща организацията с пътни знаци.

Цялото пешеходно движение се извършва по периферията на кръговото кръстовище. Забранен е достъпа на пешеходци до централния остров, а в северния клон на бул. „Христо Ботев” са обособени трамвайни спирки, повдигнати с бордюри.



фиг. 7 – Трамвайното движение е с предимство пред циркулиращите МПС. Движението е канализирано, а разделителните острови улесняват пешеходците при пресичане.

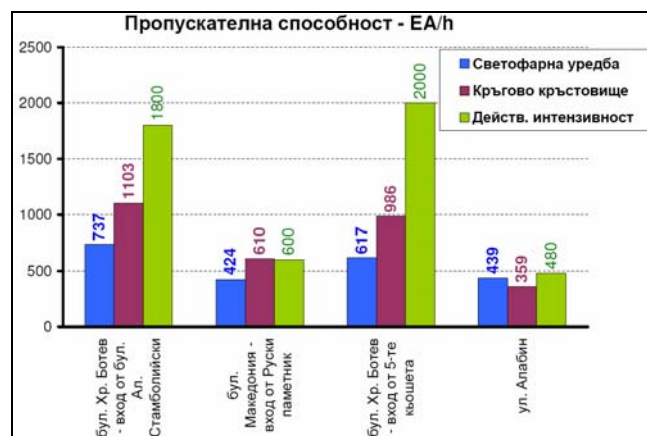
8.3. Сравнителен анализ между съществуващо и проектно решение.



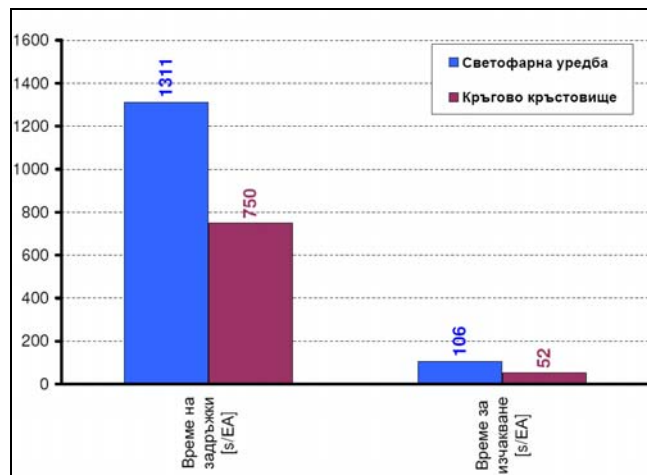
фиг. 8 – Картограма на съществуващото натоварване в кръстовището.

Капацитета на светофарно-регулираното кръстовище е изчислен на база общозвестната формула на Webster според картограма на натоварването (вж. фиг. 8), базирана на кордонно преброяване на място, проведено през м. октомври 2007 г. Капацитета на кръговото кръстовище е изчислен според нормите за проектиране на Германия и Великобритания и съпоставен с резултатите от компютърна симулация на движението. Както може да се види от диаграмата на фиг. 9 се

постига общо подобряване на пропускателната способност приблизително с 20%, като при най-проблемното направление по бул. „Христо Ботев” нарастването е с цели 35%. Действителната интензивност на движението надхвърля почти 2 пъти пропускателната способност, т.е. кръстовището продължава да работи в режим на пренасищане. Независимо от това, при схемата с кръгово кръстовище се постига значително намаляване на времето за изчакване с около 50 %, а времето на задръжки – с около 43% за всички клонове (вж. фиг. 10).



фиг. 9 – Пропускателна способност на съществуващо и проектно кръстовище при пл. „Македония”, гр. София.



фиг. 10 – Време за изчакване и задръжки – общо за всички клонове на кръстовището

Предложената схема с кръгово кръстовище би била много подходяща за изпълнение в градски условия, тъй като времето за строително-монтажните дейности ще бъде сравнително кратко и с възможности за поетапно строителство без спиране на движението. Строителната стойност ще бъде несравнимо по-ниска в сравнение с решение за пресичане на различни нива. Голяма част от съществуващите комуникации ще останат непроменени или слабо засегнати.

ИЗПОЛЗВАНА ЛИТЕРАТУРА

- [1] Норми за Проектиране на Пътища (2004), МРРБ, София
- [2] Limited priority merge at unsignalized intersections, стр. 294-302 (1997), Troutbeck, R. J. & Kako
- [3] Monograph on Traffic Flow Theory, Chapter 8 – Unsignalized Intersection Theory (1989), Troutbeck R. & Brilon W.
- [4] Guide to Traffic Engineering Practice, Part 6-Roundabouts (1993), Austroads
- [5] Highway Capacity Manual (2000), TRB Washington D.C.
- [6] Capacity and design of traffic circles in Germany (1993), Brilon W.
- [7] The traffic capacity of roundabouts (1980), Kimber R., TRRL LR 942
- [8] Conception des carrefours a sens giratoire implantés en milieu urbain (1988), Bagneux, J. Centre D'Etudes sur les Réseaux, les Transports, l'Urbanisme, et les Constructions Publiques (CERTU)
- [9] Comparison of Capacity between Roundabout Design and signalized Junction Design (2001) Tan, J., Monte Verita/Ascona
- [10] Research on Road Traffic (1965), Road Research Laboratory, H.M.S.O.
- [11] Roundabout capacity. Traffic Engineering and Control (1974), vol. 15, no. 10, p. 812-815, Armitage, D. J. & McDonald, M