

Получена: 15.09.2017 г.

Приета: 22.12.2017 г.

НАРАСТВАНЕ НА ЦЕНТРОБЕЖНОТО УСКОРЕНИЕ В ПРЕХОДНИ КРИВИ

Д. Мартинов¹

Ключови думи: пътища, скорост, пътни елементи

РЕЗЮМЕ

Публикацията разглежда минималните стойности на параметрите на преходна крива, зададени в „Наредба № 1/2000 и норми за проектиране на автомобилни пътища“. В нормативният документ са зададени ограничения на параметъра A на клотоида такива, че се получават много големи стойности на коефициента на нарастване на центробежното ускорение – j . Разгледан е критерият за избор на параметър на клотоида и в други нормативни документи, като УПАП-1979, Австрийските (RVS-2014), Германските (RAS-L-1995, RAL-2012, RAA-2008). Разгледани са различни възможности за предотвратяване на високите стойности на коефициента j , а същите са дадени като препоръки към проектантите и авторите на следваща редакция на нормите за проектиране на автомобилни пътища в нашата страна.

1. Въведение

1.1. Преходна крива

Преходната крива е елемент с променлив радиус на кривина, който има редица важни функции при установяване на пътната ос. При наличие на преходна крива в нея се помества рампата на уширението и надвишението на настилката в хоризонталната крива. Има за задача да подобри оптическата плавност на трасето, така че пътят да се възприема добре от водачите на моторните превозни средства. И не на последно място, може би най-важната функция, е да разпредели плавно появата на центробежното ускорение,

¹ Димитър Мартинов, гл. ас. д-р инж., кат. „Пътища“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: martinov@mail.com

породено от центробежната сила на движещия се с определена скорост автомобил, които навлиза в хоризонтална крива. Последната функция на преходните криви се контролира чрез условието известно като, динамически критерий за определяне на дължината на преходната крива. В математическо изражение условието може да се види в следващата формула (1).

$$L_{np} \geq \frac{V_{np}^3}{47R_0j}, \quad (1)$$

където L_{np} е дължина на преходната крива в m;

V_{np} – проектна скорост, km/h;

R_0 – радиус на циркулярната крива, m;

j – коефициент на нарастване на центробежното ускорение, m/s³.

Като имаме предвид уравнението на клотоида

$$L_{np} \geq \frac{A^2}{R_0}, \quad (2)$$

където A е параметър на преходната крива, m и го заместим във формула (1), се получава

$$A \geq \sqrt{\frac{V_{np}^3}{47j}}. \quad (3)$$

Формула (3) е също динамическо условие за преходната крива, но спрямо параметъра j .

1.2. Нарастване на ускорението

1.2.1. Коефициент на нарастване на ускорението

Нарастването на ускорението е първата производна на ускорението спрямо времето и може да се даде най-общо със следния израз:

$$\vec{j}(t) = \frac{d\vec{a}(t)}{dt} = \vec{a}'(t) = \frac{d^2\vec{v}(t)}{dt^2} = \vec{v}''(t) = \frac{d^3\vec{r}(t)}{dt^3} = \vec{r}'''(t), \quad (4)$$

където j е коефициент на нарастване на ускорението, m/s³;

a – ускорение, m/s²;

v – скорост, m/s;

r – позиция, m.

1.2.2. Коефициент на нарастване на центробежното ускорение

Стойностите на коефициента се приемат така, че да не се допусне неприятно усещане в хората върху които действа нарастването на ускорението. Получават се опитно и има различна степен на влияние при различните типове движения.

Във вертикална посока оказват най-малко влияние върху усещането на хората: допустими усещания до 2 m/s^3 , недопустими до 6 m/s^3 , за болници се приема $0,7 \text{ m/s}^3$.

В хоризонтална посока бива надлъжно и напречно усещане.

Надлъжното е при ускорение и спиране и се понася по-добре от напречното.

Напречното усещане е при промяна на посоката на движение, както е в случая с центробежната сила при движението в преходна крива. Може да се отбележи, че стойности до $0,35 \text{ m/s}^3$ се усещат слабо, стойности до 1 m/s^3 са в границите на комфорта и по големи се усещат неприятно. Има редица конструктивни изисквания към коефициента поради факта, че е отговорен за износването на линиите при железопътния транспорт и на настилката и автомобилните гуми при автомобилния. Да не се забравя и евентуалната възможност за загуба на сцепление между автомобилните гуми и настилката.

За проектиране на пътища стойностите на j се избират от $0,3$ до 1 m/s^3 . Ниската стойност е за най-високите проектни скорости, тези при автомагистрала и първокласни пътища – над 80 km/h . Тук има много висока интензивност на движението и комфортът е от съществено значение. Високата стойност е при ниски скорости, където имаме местни пътища с много слаба интензивност на движението – 30 km/h . С цел икономия, от гледна точка на гъвкавостта на пътната ос се допускат съответно и по-високи стойности на j , от където идват и по-къси преходни криви, които да осигурят безопасното преминаване без приплъзване, макар и с по-голямо неудобство при движение.

2. Положение на коефициента j в нормативната уредба

Допустимите стойности за коефициентът j могат да се получат като се решат равенствата от формули (2) и (3) спрямо j .

$$j \geq \frac{V_{np}^3}{47R_0L_{np}}, \quad (5)$$

$$j \geq \frac{V_{np}^3}{47A^2}. \quad (6)$$

2.1. България

2.1.1. Настоящ нормативен документ в нашата страна – Наредба № 1/2000 и норми за проектиране на автомобилни пътища

Настоящата нормативна уредба дава ограничения за клотоида единствено чрез таблица за минималния параметър A в зависимост от проектната скорост V_{np} . Ако към тази таблица се приложи и минималният радиус на хоризонталната крива в зависимост също от проектната скорост ще може да се получи по обратен ред стойността на j .

Таблицата, която обединява нормативните и минимални стойности на параметъра A и споменатите данни за радиус и коефициент на нарастване на центробежното ускорение, пресметнато в зависимост от тях има следният вид.

Таблица 1. Наредба 1/2000 – Проектна скорост, минимален параметър A на клоотоида, минимален радиус на хоризонтална крива и коефициент на нарастване на центрострежното ускорение

Проектна скорост V_{np} в [km/h]	Минимален параметър на преходната крива $\min A$ в [m]	Минимален радиус на хоризонталната крива $\min R_{кр}$ в [m]	$j \geq \frac{V_{np}^3}{47A^2}$, j [m/s ³]
40	25	45	2,179
50	35	80	2,171
60	45	120	2,270
70	60	180	2,027
80	80	250	1,702
90	110	340	1,282
100	150	450	0,946
110	190	600	0,784
120	240	720	0,638

Виждат се високите стойности на коефициента j , което е доста обезпокоително имайки предвид изложеното в преходната точка.

2.1.2. Преходен нормативен документ в нашата страна – Указания за проектиране на автомобилни пътища ГУП от 1979 г.

Таблица 2. УПАП-1979 – Проектна скорост, минимален радиус на хоризонтална крива, минимален параметър A на клоотоида, минимална дължина на клоотоида и коефициент на нарастване на центрострежното ускорение в зависимост от тях

Проектна скорост V_{np} в [km/h]	Минимален радиус на хоризонталната крива $\min R_{кр}$ в [m]	Минимален параметър на преходната крива $A = R/3$	$j \geq \frac{V_{np}^3}{47A^2}$, j [m/s ³]	Минимална дължина на преходната крива $L_{np} = V_{np}$	$j \geq \frac{V_{np}^3}{47R_0 L_{np}}$, j [m/s ³]
40	60	20,00	3,404	40	0,567
60	160	53,33	1,616	60	0,479
80	350	116,67	0,800	80	0,389
100	600	200,00	0,532	100	0,355
120	1000	333,33	0,331	120	0,306
140	1400	466,67	0,268	140	0,298

В УПАП-1979 като критерии за минимални елементи на преходна крива са използвали условията за оптическа плавност на трасето $A \geq R/3$ и в зависимост от начина на преоформяне на напречния наклон на настилката в хоризонтална крива $L_{np} \geq 1V_{np}$. Тези условия дават доста по-ниски стойности на j , които могат да се видят на следващата табл. 2. В УПАП минималните стойности на хоризонталните криви са по-големи от тези в сегашната наредба 1/2000 г. Меродавно в повечето случаи е било условието за

преоформяне на настилката, чак при по-големи радиуси на хоризонтални криви се появява необходимостта от изискването $A \geq R/3$, но вече преходната крива е с доста по-голяма дължина от където и j ще се получи с ниски стойности. Или иначе казано меродавно е условието за преоформяне на напречния наклон на настилката, а после условието за оптическа плавност. Динамическото условие, което основно третира коефициента j , с неговите максимални стойности е далеч под стойностите на горните две условия и не се използва.

2.2. Австрия

2.2.1. RVS-2014

Основният критерий за избор на параметър на преходната крива е радиусът на хоризонталната крива заедно с минималната дължина на клотоидата. Данните за скоростите, радиусите, дължината на клотоидата, както и пресметнатите стойности на коефициента j , могат да се видят на следващата таблица.

Таблица 3. RVS-2014 – Проектна скорост, минимален радиус на хоризонтална крива, минимална дължина на клотоида и коефициент на нарастване на центробежното ускорение в зависимост от тях

Проектна скорост V_{np} в [km/h]	Минимален радиус на хоризонталната крива $\min R_{кр}$ в [m]	Минимална дължина на преходната крива L_{np}	$j \geq \frac{V_{np}^3}{47R_0 L_{np}}$, j [m/s ³]
40	30	15	3,026
50	50	20	2,660
60	80	30	1,915
70	130	39	1,439
80	200	44	1,238
90	300	50	1,034
100	400	56	0,950
110	500	61	0,928
120	600	67	0,915
130	800	72	0,812

Забелязва се очаквана тенденция за намаляване на коефициента j с нарастване на скоростта. Има по-ниски стойности на коефициента j спрямо наредба № 1/2000, като най-силно това се забелязва при скоростите под 90 km/h.

2.3. Германия

2.3.1. RAS-L-1995

Основният критерий за избор на параметър на преходната крива е радиусът на хоризонталната крива, като условието е $A \geq R/3$, но са дадени отделно и минимални стой-

ности. Данните на скоростите, радиусите, параметъра на клотоида, както и пресметнатите стойности на коефициента j , могат да се видят на следващата таблица.

Таблица 4. RAS-L-1995 – Проектна скорост, минимален радиус на хоризонтална крива, минимален параметър A на клотоида и коефициент на нарастване на центробежното ускорение в зависимост от тях

Проектна скорост V_{np} в [km/h]	Минимален радиус на хоризонталната крива $\min R_{sp}$ в [m]	Минимален параметър на преходната крива $\min A$ в [m]		$j \geq \frac{V_{np}^3}{47A^2}$, j [m/s ³]		Минимален параметър на преходната крива $A = R/3$	$j \geq \frac{V_{np}^3}{47A^2}$, j [m/s ³]	
50	80	30		2,955		26,67		3,740
60	120	40		2,872		40,00		2,872
70	180	60		2,027		60,00		2,027
80	250	80		1,702		83,33		1,569
90	340	110		1,282		113,33		1,208
100	450	150	120	0,946	1,478	150,00		0,946
120	720	240	120	0,638	2,553	240,00		0,638

Тук се виждат същите високи стойности на j , както при наредба № 1/2000 г.

2.3.2. RAL-2012 и RAA-2008

При RAL или нормите третиращи проектните класове при еднолентовите, двулентовите и трилентовите пътища основният критерий за избор на параметър на преходната крива е радиусът на хоризонталната крива, като условието е $A \geq R/3$.

При RAA или нормите третиращи автомагистралите, основният критерий за избор на параметър на преходната крива е радиусът на хоризонталната крива, като условието е също $A \geq R/3$, но тук са дадени отделно и минимални стойности. Данните на скоростите, радиусите на хоризонталните криви, параметъра на клотоида, както и пресметнатите стойности на коефициента j в зависимост от тях, могат да се видят на следващата таблица.

Таблица 5. RAL-012, RAA-2008 – Скорост, минимален радиус на хоризонтална крива, минимален параметър A на клотоида, и коефициент на нарастване на центробежното ускорение в зависимост от тях

Документ	Проектен клас	Скорост V_{np} в [km/h]	Минимален параметър на преходната крива $\min A$ в [m]		$j \geq \frac{V_{np}^3}{47A^2}$, j [m/s ³]		Минимален радиус на хоризонталната крива $\min R_{sp}$ в [m]	Минимален параметър на преходната крива $A = R/3$	$j \geq \frac{V_{np}^3}{47A^2}$, j [m/s ³]	
RAL	EKL 4	70				200		66,67		1,642
	EKL 3	90				300		100,00		1,551
	EKL 2	100				400		133,33		1,197
	EKL 1	110				500		166,67		1,019
RAA	EKA 3	80	90		1,345	280		93,33		1,251
	EKA 2	100	160		0,831	470		156,67		0,867
	EKA 1B	120	240		0,638	720		240,00		0,638
	EKA 1A	130	300		0,519	900		300,00		0,519

Забеляват се по-ниски стойности на коефициента j , отколкото при останалите нормативни документи освен при УПАП 1979 г.

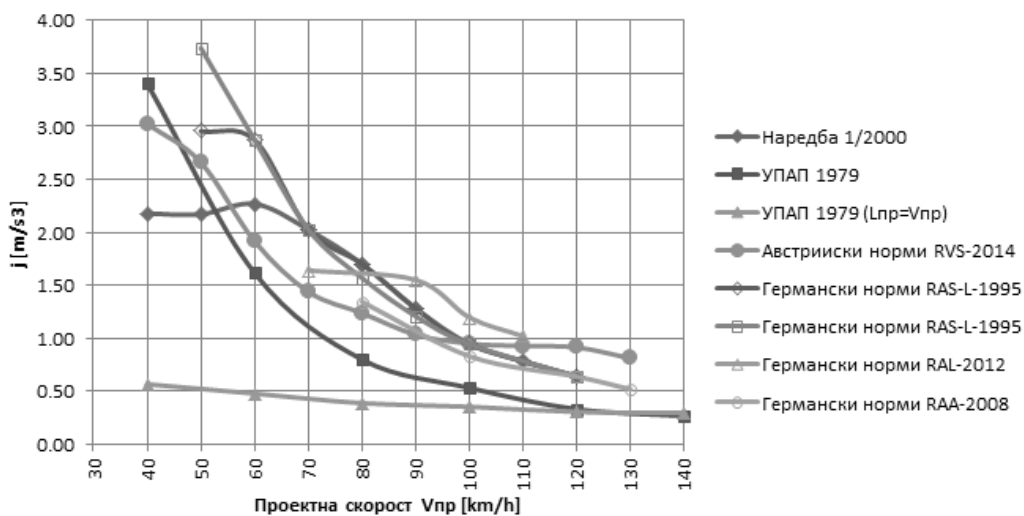
3. Съпоставяне на коефициента j спрямо разглежданите нормативни документи

Стойностите на коефициента на нарастване на центробежното ускорение в настоящата наредба на страната ни кореспондират със старите норми на Германия – RAS-L-1995. Съответствието е с критерия за $\min A$ и то за скорости над 70 km/h. Под тази скорост стойностите на RAS-L, са доста по високи.

Австрийските норми RVS-2014 имат малко по-високи стойности на j , но само за скорости под 50 km/h. За останалите скорости, j е с много по ниски стойности от тези на наредба № 1/2000 г. Същото е положението и с Германските норми RAA-2008 третиращи скоростите от 80 до 130 km/h, стойностите на j са по-ниски от нашата наредба. При скорости под 70 km/h Германските норми RAL-2012 допускат по високи стойности на j .

Най ниски стойности на j са постигнати в УПАП-1979 при критерия за преоформяне на напречния наклон, където изискването е $L \geq V_{np}$, но това е единственото място където е използван този критерий. Обикновено съвременните норми използват основно оптичното условие $A \geq R/3$ или дават директно минимални стойности на параметъра на клоотоида, като в общи линии са със сравнително близки стойности спрямо коефициента j .

Стойностите на коефициента j спрямо проектната скорост в разглежданите нормативни документи и различните критерии в тях може да се видят на следващата фиг. 1.



Фиг. 1. Стойности на коефициента j спрямо проектната скорост в разглежданите нормативни документи и различните критерии в тях

4. Заключение и препоръки

В следващата таблица са разгледани различните критерии за избор на минимален параметър A на клоотоида, спрямо настоящата нормативна уредба у нас.

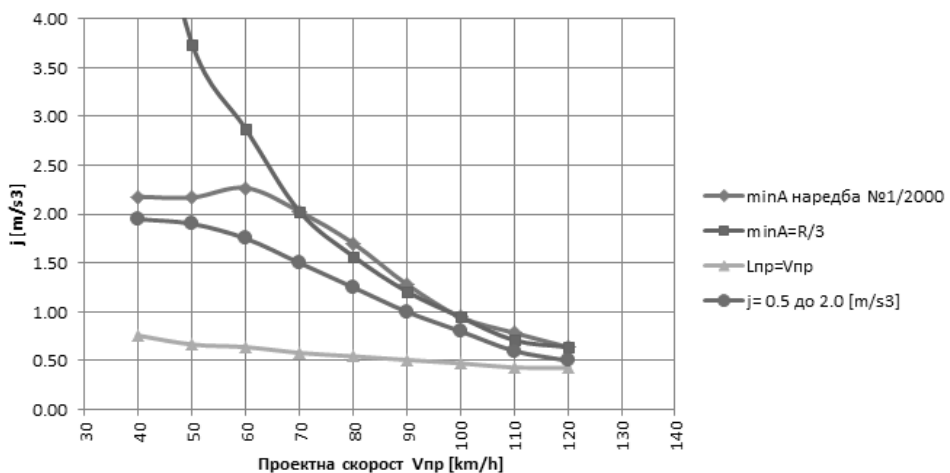
Таблица 6. Наредба 1/2000 – Различни критерии за избор на минимален параметър A на клоотоида и състоянието на коефициента j за всеки един от тях

V_{np} [km/h]	min R_{sp} [m]	Критерии за избор на минимален параметър A на клоотоида									
		minA наредба № 1/2000		minA = R/3		$L_{np} = V_{np}$			$j = 0,5$ до $2,0$ [m/s ³]		
		A [m]	j [m/s ³]	A [m]	j [m/s ³]	L_{np}	$A = \sqrt{R_0 L_{np}}$	j [m/s ³]	j [m/s ³]	$A \geq \sqrt{\frac{V_{np}^3}{47j}}$	A/minA от № 1/2000 [%]
40	45	25	2,179	15,00	6,052	40	42,43	0,757	1,95	26,43	5,70
50	80	35	2,171	26,67	3,740	50	63,25	0,665	1,90	37,42	6,90
60	120	45	2,270	40,00	2,872	60	84,85	0,638	1,75	51,25	13,88
70	180	60	2,027	60,00	2,027	70	112,25	0,579	1,50	69,75	16,25
80	250	80	1,702	83,33	1,569	80	141,42	0,545	1,25	93,35	16,69
90	340	110	1,282	113,33	1,208	90	174,93	0,507	1,00	124,54	13,22
100	450	150	0,946	150,00	0,946	100	212,13	0,473	0,80	163,08	8,72
110	600	190	0,784	200,00	0,708	110	256,90	0,429	0,60	217,25	14,34
120	720	240	0,638	240,00	0,638	120	293,94	0,426	0,50	271,16	12,99

Както стана ясно основният критерий за избор на минимален параметър на клоотоида в момента у нас е директно чрез минимални стойности. Нека разгледаме какво ще се случи ако добавим паралелно допълнителни критерии, такива каквито са използвани в разгледаните нормативи:

- за оптическа плавност където условието е $A \geq R/3$;
- от УПАП за преоформяне на напречният наклон, където условието е $L_{np} \geq V_{np}$;
- препоръчан критерии третиращ директно стойностите на коефициента j , като след това се пресметне параметърът по формула (3).

Всичко това е пресметнато за съответните скорости и минимални радиуси на хоризонталните криви от наредба № 1/2000 г. в табл. 6 и е онагледено в следващата фиг. 2.



Фиг. 2. Стойности на коефициента j спрямо проектната скорост спрямо различните критерии за минимален параметър A в наредба № 1/2000 г.

Стойностите на коефициента j за последния, препоръчан критерии са в границите от 0,5 до 2,0 m/s^3 и са взети така, че кривата за j във фиг. 2 да отговаря на следните условия:

- да тангира в стойност 2,0 при скорости клонящи към 30 km/h;
- да тангира в стойност 0,5 при скорости по големи от 120 km/h;
- от 70 до 120 km/h кривата е средно между стойностите на RVS-2014, RAA-2008.

По този начин се получава крива с оптимални стойности на параметъра j , които съответстват на малко по високи стойности на параметъра A от сегашния нормативен документ. Нарастването може да се види в последната колона на табл. 6. По високите стойности на A налагат използването и на малко по-дълги преходни криви от тези, които се получават при $\min A$.

Въпреки всичко, с оглед на безопасността и комфорта при движение препоръчвам в следващата редакция на нормите за проектиране на пътища да се приложат минимални стойности на параметъра A на клоотоида, обезпечавачи максимални стойности на параметъра j в рамките до 2 m/s^3 и то за ниските и средните скорости (30 – 70 km/h). А на проектантите, да се опитват да проектират с по-богати пътни елементи по възможност, специално със стойности на параметъра A такива, че j да е в рамките на 0,3 до 1,0 m/s^3 .

ЛИТЕРАТУРА

1. *Сотиров, Д.* Проектиране на пътища. Техника, 1983 г.
2. Указания за проектиране на автомобилни пътища. ГУП, 1979 г.
3. Наредба № 1/2000 норми за проектиране на автомобилни пътища. МРРБ, 2000 г.
4. RVS – Linienführung und trassierung. Ausgabe 2014.
5. RAS-L – Richtlinie für die Anlage von Straßen. Ausgabe 1995.
6. RAL – Richtlinie für die Anlage von Landstraßen. Ausgabe 2012.
7. RAA – Richtlinien für die Anlage von Autobahnen. Ausgabe 2008.

INCREASE IN CENTRIFUGAL ACCELERATION IN TRANSITION CURVES

D. Martinov¹

Keywords: roads, speed, road elements

ABSTRACT

The publication discusses the minimum values of the transition curve parameters set out in “Regulation No. 1/2000 and Road Design Rules”. In the normative document, limiting parameter A of the clothoid is set, such that very large increments of coefficient of centrifugal acceleration are obtained – j . The selection criterion is considered a clothoid parameter and other normative documents such as UPAP-1979, Austrian (RVS-2014), German (RAS-L-1995, RAL-2012, RAA-2008). Various options have been considered to prevent high coefficients j and these are given as recommendations to designers and authors of a subsequent revision of the norms for the design of motorways in our country.

¹ Dimitar Martinov, Chief Assist. Prof. Dr. Eng., Dept. ”Roads Construction”, UACEG, 1 H. Smirnski Blvd., Sofia 1046, e-mail: martinov@mail.com