

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ПРОМЯНАТА НА СТРАНИЧНОТО НЕПОГАСЕНО УСКОРЕНИЕ В ПОДРОБНИ ТОЧКИ НА НЯКОЛКО ТИПА ПРЕХОДНИ КРИВИ

Майя Иванова, Николай Арnaudов
mai_5e@abv.bg, nikiarbg@gmail.com

**ВТУ „Т. Каблешков”
София 1574, ул. „Гео Милев”158
БЪЛГАРИЯ**

Ключови думи: *непогасени странични ускорения, динамика на движение , преходна крива, надвишение, радиус на кривината , скорост*

Резюме: *В доклада е направен сравнителен анализ на няколко типа преходни криви при скорости от 100 до 200 км/час . Изследвани са различията по отношение на динамиката на движение , основавайки се на промяната на страничното непогасено ускорение в подробни точки на различните видове преходни криви .*

При движението на влака в преходна и кръгова крива най-съществено динамично въздействие оказва страничното непогасено ускорение, възникващо вследствие на действащата центробежна сила. Най-голямо е влиянието му върху безопасността, комфорта и сигурността на пътуване, когато подвижния състав преминава по тези елементи. Поради това стремежът трябва да бъде преди всичко към ограничаване на повтаряемостта на въздействията на страничните ускорения върху пътниците и намаляване на тяхната големина. Един начин да се постигне това е даването на надвишение на външната релсова нишка спрямо вътрешната в кривите. Това несъмнено води до намаляване на големината на центробежната сила, но пак се появява ново въздействие – центростремителна сила, вследствие наклона на превозното средство към центъра на кривата. Тази сила от своя страна също оказва неблагоприятно въздействие в някои случаи – например при принудително спиране на влака в кривата.

Изследванията относно въздействията на страничните ускорения върху самочувствието на пътниците показват, че ускорения до $\alpha_n=0,15 \text{ м/с}^2$ се намират на границата на усещането. При такъв размер на ускорението возилата се движат спокойно, пътниците изпитват сигурност във возенето, товарите лежат устойчиво, а и релсите се износват равномерно. С нарастване на странични ускорения до $\alpha_n=0,31 \text{ м/с}^2$ се достига до състояние, при което пътниците усещат слабо тяхното въздействие, но движението на возилата е безупречно по всички споменати показатели. Когато страничните ускорения достигнат $0,6$ до $0,7 \text{ м/с}^2$, движението на железопътните возила става неспокойно, товарите започват да се преместват, релсите се натоварват неравномерно, от което следва нееднаквото им износване, а що се отнася до пътниците, те загубват чувството си за сигурност и стават неспокойни, макар сигурността на

движението на влаковете още да не е застрашена. Критично става движението на возилата при странични ускорения с размер $1,3 - 1,4 \text{ м/с}^2$, когато товарите започват да се плъзгат, движението е крайно неспокойно, натоварването на релсите е толкова неравномерно, че може да се стигне до разрушаването им или на други елементи на горното строене и до произшествия със сериозни последици.

Съгласно Наредба №55 за проектиране и строителство на железопътни линии, железопътни гари, железопътни прелези и други елементи от железопътната инфраструктура (Обн. ДВ. бр.18 от 5 Март 2004г) у нас е прието допустимото максимално непогасено центробежно ускорение да е $0,65 \text{ м/с}^2$, а максималното центростремително ускорение при спиране на влак в крива в междугарие или в гара в крива без перон да е $0,98 \text{ м/с}^2$ при максимално разрешено надвишение 150 мм (жп линии I и II категория) и $1,05 \text{ м/с}^2$ при надвишение 160 мм (железопътни магистрали). Тези ограничителни стойности ще бъдат използвани по нататък при сравнение на резултатите.

Както е известно непогасеното центробежно ускорение в кръгова крива се изчислява по формулата:

$$\alpha_n = \frac{V^2}{13.R} - \frac{h}{153}, (\text{м/с}^2) \quad (1)$$

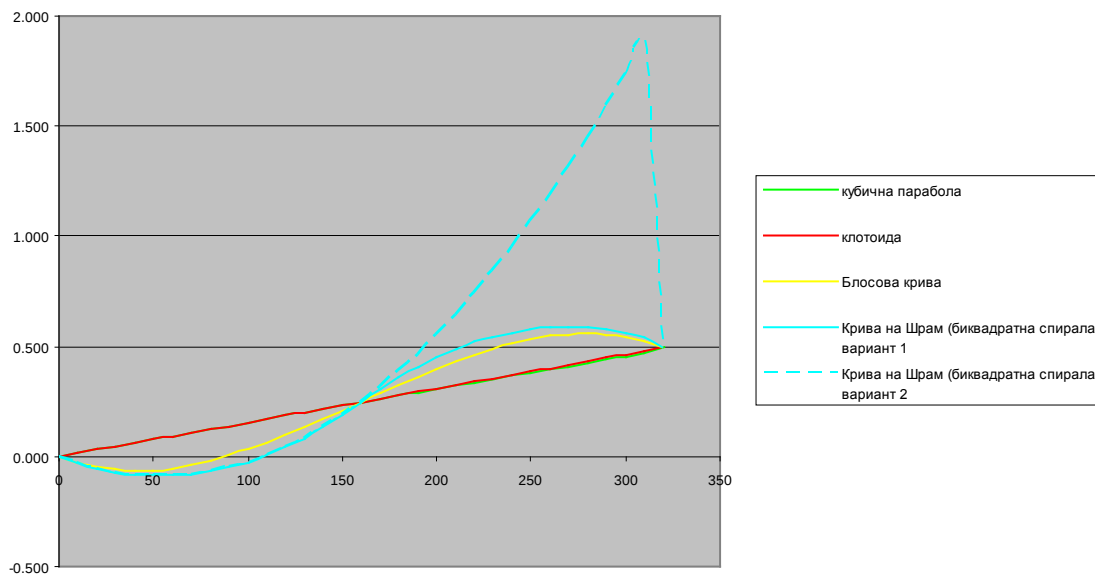
където V е скоростта на движение на влака (км/ч)

R – радиусът на кръговата крива (м)

h – надвишението м/у двете релсови нишки в кръговата крива (мм)

В преходната крива радиусът и надвишението се променят постоянно. Преходът /рампата/ на надвишението съгласно Наредба №55 (Обн. ДВ. бр.18 от 5 Март 2004г) се прави праволинеен с наклон $K=10.V_{\max}$ и при ново строителство началото на прехода съвпада с начало преходна крива, а края на прехода съвпада с края на преходната крива. Следователно като са изчислени предварително надвишението и дължината на преходната крива чрез линейна интерполация може да се определи стойността на надвишението в произволна точка от преходната крива. Радиусът в преходната крива се променя от $\rho=\infty$ в НПК до $\rho=R$ в КПК, а в интервала от НПК до КПК ρ се изменя от безкрайност до R постоянно, плавно и монотонно. Радиусът в произволна точка от преходната крива може да се получи като се използва метод на линейно приближение и диференциално смятане. След като бъдат определени неизвестните величини по формула (1) може да се изчисли непогасеното центробежно ускорение за коя да е разглеждана точка от преходната крива.

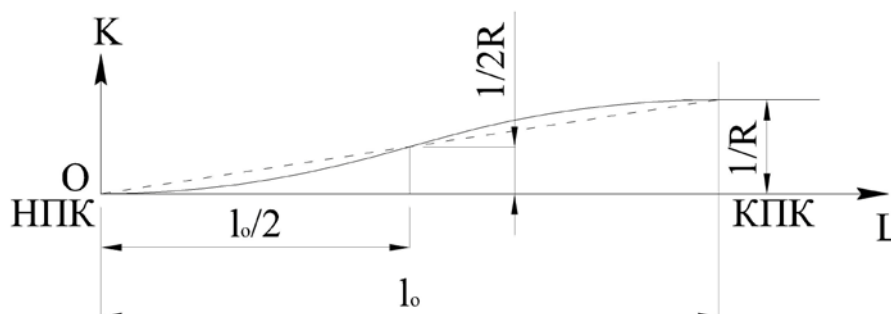
В сравнителния анализ ще бъдат разгледани няколко типа преходни криви: кубична парабола, клотоида, Блосова крива и два варианта на крива на Шрам при скорости от 100 до 200 км/час. С цел да се видят най-неблагоприятните резултати ще се работи с минимално допустимите радиуси съгласно Наредба №55 (Обн. ДВ. бр.18 от 5 Март 2004г) за съответните скорости: за 100 км/час – $R=500 \text{ м}$, за 130 км/час – 800 м , за 160 км/час – 1500 м и за 200 км/час – 2500 м . За начало чисто експериментално ще бъде разгледан дори още по-неблагоприятен пример за скорост 200 км/час и радиус 2000 м (при този случай се получава максимална дължина на преходната крива и максимално надвишение от 160 мм). С цел по-лесно пресмятане е съставен алгоритъм на MS Office Excel, а резултатите са показани на фиг 1.



фиг. 1

От фигурата е видно, че изменението на страничното непогасено центробежно ускорение при кубична парабола и клотоида е линейно по дължината на преходната крива до максималната си стойност в кръговата крива, която в случая е $0,49 \text{ м/с}^2$, като графиките на тези два типа преходни криви почти напълно съвпадат. Следователно за нашите условия дори и при този най-неблагоприятен случай (от гледна точка дължината на преходната крива), двата типа преходни криви имат сходни, дори може да се каже почти напълно съвпадащи характеристики, както в геометрично, така и в динамично отношение.

За разлика от тях, при другите два типа криви ситуацията е различна. От фиг. 1 се вижда, че Блосовата крива и първия вариант на крива на Шрам имат криволинейна графика на изменение на ускоренията. При тях се получават екстремуми, чиито положителни стойности надхвърлят стойността на ускорението в кръговата крива. Това се дължи на факта, че прехода /рампата/ на надвишение е изпълнен праволинеен. Ако той бе изпълнен съгласно теорията /фиг. 2/ с вид подобен на очертанието на графиката на двете криви, то тогава те щяха да имат



фиг. 2

линейно изменение на нарастването на ускоренията или отново криволинейно изменение, но с много по-малки екстремуми. Също така е видно, че в началния участък

на преходната крива центробежното ускорение има отрицателни стойности, което значи, че се появява центростремително ускорение, отново дължащо се на праволинейното очертание на прехода на надвишение, понеже кривината на тези два типа преходни криви се променя по-бавно отколкото нарастването на надвишението (колкото е от по-висока степен уравнението на преходната крива толкова в началната си част тя се доближава до права) и фактически ускорението при повдигане на външното колело в този участък е по-голямо отколкото центробежното ускорение.

В геометрично отношение вариант 2 на крива на Шрам бе получен, като координатите на подробните точки са пресметнати по формулите за първата половина на кривата, но по цялата дължина на преходната крива. В резултат бе налице такъв вид крива, която има начална част с по-малка кривина в сравнение с кубичната парабола и клотоидата, но в КПК еднакво с тях отместване p (за разлика от Блосова крива и вариант 1 на крива на Шрам, при които отместването е по-малко). Отговор дали такъв тип крива е приложим за изплзване в железниците като преходна крива дава фиг. 1. Ясно се вижда, че във втората половина на преходната крива страничните непогасени центробежни ускорения се повишават до нива, доста превишаващи допустимите граници ($0,65 \text{ м/с}^2$), след което в КПК последва внезапен динамичен удар за да достигнат стойността си в кръговата крива. Този резултат показва, че за да се компенсира първоначалната по-изправена в геометрично отношение част от преходната крива, в крайния участък радиусът интензивно намалява и достига стойности по-малки от радиуса в кръговата крива, видно от таблицата с изчисленията.

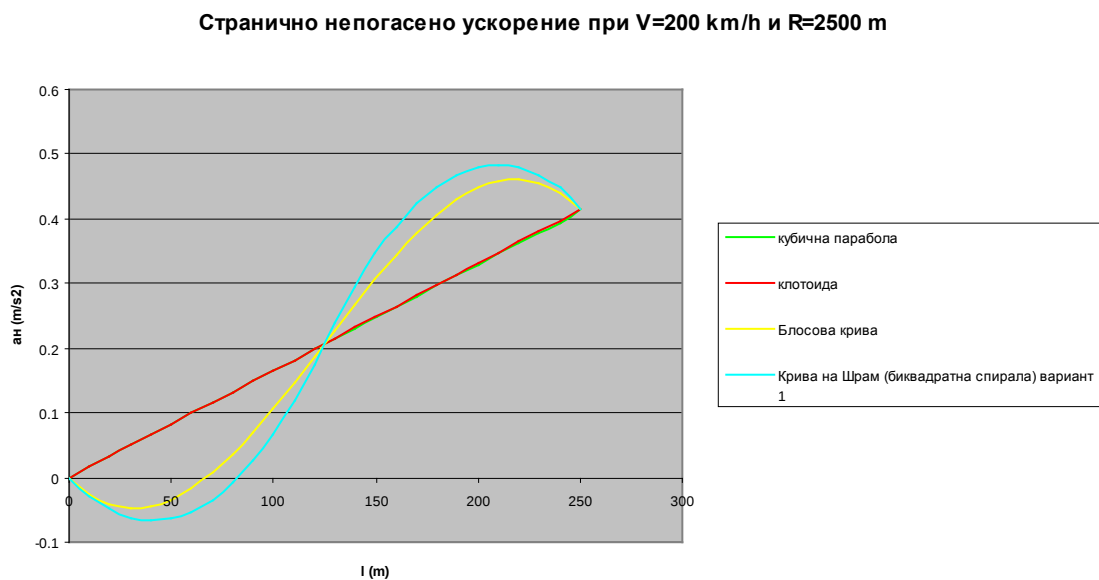
Таблица 1

Крива на Шрам (биквадратна спирала) вариант 2 при R=2000m и V=200 km/h										
α_n	h	R	Δy	Δx	m_1	m_2	dy/dx	Δm	$\Delta x'$	d^2y/dx^2
0.000	0 ∞									
-0.03	5	877714.29	0.000	10.000	0.0000008138	1.2207E-05	6.51042E-06	0.0000113932	10	1.13932E-06
-0.05	10	245760.00	0.000	10.000	1.2207E-05	5.2897E-05	3.25521E-05	4.06901E-05	10	4.06901E-06
-0.07	15	111709.09	0.001	10.000	5.28971E-05	0.00014242	9.76563E-05	8.95182E-05	10	8.95182E-06
-0.08	20	63340.20	0.001	10.000	0.000142415	0.00030029	0.000221354	0.000157878	10	1.57878E-05
-0.09	25	40688.74	0.003	10.000	0.000300293	0.00054606	0.000423177	0.000245768	10	2.45768E-05
-0.09	30	28313.36	0.005	10.000	0.000546061	0.00089925	0.000722656	0.00035319	10	3.5319E-05
-0.08	35	20827.10	0.009	10.000	0.000899252	0.0013794	0.001139324	0.000480144	10	4.80145E-05
-0.07	39.99999	15958.42	0.014	10.000	0.001379396	0.00200603	0.001692711	0.00062663	10	6.26631E-05
-0.05	44.99998	12615.98	0.020	10.000	0.002006026	0.00279868	0.002402351	0.00079265	10	7.92653E-05
-0.03	49.99996	10222.90	0.028	10.000	0.002798676	0.00377688	0.00328778	0.000978206	9.9999	9.78212E-05
0.005	54.99993	8451.08	0.038	10.000	0.003776883	0.00496019	0.004368534	0.001183302	9.9999	0.000118331
0.041	59.99986	7102.77	0.050	10.000	0.004960185	0.00636813	0.005664158	0.001407946	9.9998	0.000140797
0.083	64.99976	6053.04	0.064	10.000	0.006368131	0.00802028	0.007194205	0.001652147	9.9997	0.000165219
0.132	69.9996	5219.83	0.080	10.000	0.008020279	0.0099362	0.00897824	0.001915923	9.9996	0.0001916
0.186	74.99935	4547.46	0.099	10.000	0.009936202	0.0121355	0.01103585	0.002199297	9.9994	0.000219943
0.247	79.99898	3997.03	0.121	9.999	0.012135499	0.0146378	0.013386651	0.002502304	9.9991	0.000250253
0.313	84.99845	3540.74	0.146	9.999	0.014637803	0.01746279	0.016050297	0.002824989	9.9987	0.000282536
0.386	89.99768	3158.28	0.175	9.998	0.017462792	0.02063021	0.019046502	0.00316742	9.9982	0.0003168
0.465	94.99662	2834.53	0.206	9.998	0.020630212	0.02415989	0.022395052	0.003529681	9.9975	0.000353057
0.549	99.99516	2558.05	0.242	9.997	0.024159893	0.02807178	0.026115837	0.003911888	9.9966	0.000391323
0.64	104.9932	2320.04	0.281	9.996	0.028071781	0.03238597	0.030228876	0.00431419	9.9954	0.000431617
0.737	109.9906	2113.68	0.324	9.995	0.032385972	0.03712275	0.034754361	0.004736778	9.9939	0.000473965
0.84	114.9871	1933.58	0.371	9.993	0.03712275	0.04230265	0.039712698	0.005179895	9.9921	0.0005184
0.949	119.9826	1775.44	0.423	9.991	0.042302645	0.04794649	0.045124569	0.005643847	9.9898	0.000564962
1.064	124.9769	1635.82	0.479	9.989	0.047946492	0.05407551	0.051010999	0.006129013	9.987	0.000613701

α_n	h	R	Δy	Δx	m_1	m_2	dy/dx	Δm	$\Delta x'$	d^2y/dx^2
1.186	129.9696	1511.92	0.540	9.985	0.054075505	0.06071137	0.057393436	0.006635862	9.9835	0.000664682
1.313	134.9604	1401.44	0.606	9.982	0.060711367	0.06787634	0.064293852	0.00716497	9.9793	0.000717981
1.448	139.9489	1302.49	0.677	9.977	0.067876338	0.07559337	0.071734855	0.007717036	9.9743	0.000773692
1.588	144.9347	1213.51	0.754	9.972	0.075593373	0.08388628	0.079739826	0.008292905	9.9683	0.000831928
1.735	149.9172	1133.17	0.836	9.965	0.083886278	0.09277987	0.088333075	0.008893593	9.9612	0.000892827
1.889	154.8959	1060.38	0.924	9.957	0.092779871	0.10230019	0.09754003	0.009520317	9.9527	0.000956553
0.493	160	2000	1.018	9.948						

Това е недопустимо и води до динамичен удар в КПК, което е нарушение както на теорията за преходните криви, така и на правилата за плавност и безопасност на движението на влаковете. Този тип преходна крива не може да бъде използвана в железниците и няма да бъде разглеждана по-надолу.

Сега последователно ще бъдат разгледани описаните по-горе гранични случаи. За допустима скорост 200 км/час и радиус 2500 м резултатите са показани на фиг. 3

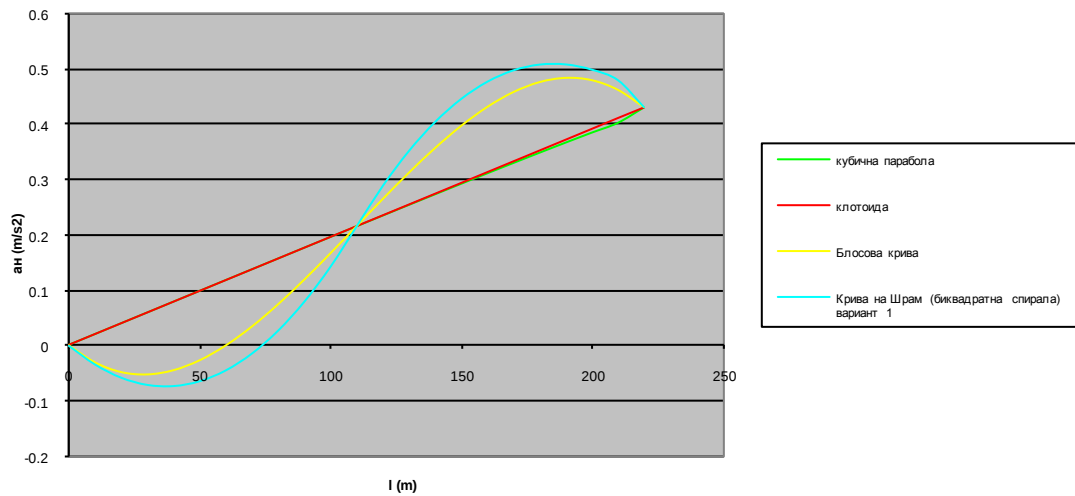


фиг. 3

От фигурата се вижда, че стойностите на ускоренията са в допустимите граници. Графиките на изменение на непогасеното центробежно ускорение са аналогични на първия случай за различните типове преходни криви.

За допустима скорост 160 км/час и минимален допустим радиус 1500 м резултатите са показани на фиг. 4

Изменение на a_n в переходна крива при $V=160 \text{ km/h}$ и $R=1500 \text{ m}$

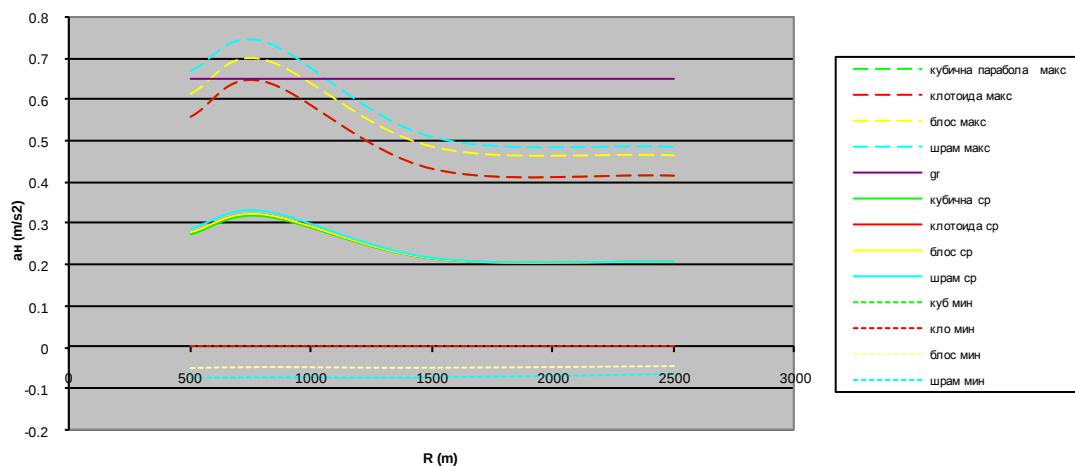


фиг. 4

И тук е видно, че по вид графиките са аналогични на горните два случая, разликата е само в големината на екстремните стойности на Блосова крива и крива на Шрам и големината на ускорението в кръговата крива. По аналогичен начин се получават и резултатите при другите два случая - за 100 km/h и $R=500 \text{ m}$ и за 130 km/h и радиус 800 m .

На фиг. 5 е показано изменението на максималните, средните и минималните стойности на непогасеното центростремо ускорение за различните минимално допустими радиуси в скоростния диапазон $100 - 200 \text{ km/h}$.

Изменение на максималното, средното и минималното непогасено странично ускорение в переходните криве в зависимост от радиуса на кръговата крива



фиг. 5

От графиката става ясно, че най-неблагоприятния случай се получава при радиус 800 m и скорост 130 km/h . Тогава $a_n = 0,6446$ в КПК, а при Блосова крива и крива на Шрам има дори превишаване на допустимата стойност в точката на екстремум. Минималните стойности на двата типа переходни криве са с много в границите на

допустимото максимално центростремително ускорение. Би било удачно при проектиране на участъци с тази проектна скорост да се избягва да се работи с минимално допустимия радиус. Също такава превишение на допустимата стойност има кривата на Шрам за радиус 500 м и скорост 100 км/час, докато Блосовата крива е под границата. При по-големите скорости и радиуси максималните стойности и при четирите типа ПК са в допустимите граници.

От получените резултати може да се направят следните заключения: в скоростния диапазон 100 – 200 км/час при условията на Наредба №55 (Обн. ДВ. бр.18 от 5 Март 2004г) в динамично и геометрично отношение най-подходящи за използване са кубичната парабола и клотоидата, като разликите както в тяхната геометрия, така и във възникващите динамични въздействия (които нарастват линейно до максималната им стойност в КПК) са пренебрежимо малки. При Блосова крива и крива на Шрам ускоренията по дължината на ПК се изменят нелинейно, като се получават екстремуми както с положителен (по-големи стойности от тези в кръговата крива), така и с отрицателен знак (центростремително ускорение), дължащи се праволинейното очертание на прехода /рампата/ на надвишение. Вариант 2 на крива на Шрам, който има отместване еднакво с това на кубичната парабола и клотоидата се оказва неприложим за железниците и изобщо като вид преходна крива, поради нарушаване на правилата за плавност и непрекъснатост на движението, тъй като се получава чупка в КПК. При проектни скорости до 130 км/час е желателно да се избягва работа с минимално допустимия радиус от 800 м, поради факта че в този случай се достига допустимата стойност на страничното непогасено ускорение при клотоида и кубична парабола, при Блосова крива и крива на Шрам дори е над допустимото, а стремежът при проектиране на високоскоростните жп линии е то да не надвишава $0,5 \text{ м/с}^2$.

ЛИТЕРАТУРА:

- [1] Иванов, Г., Горно строене и поддържане на железния път, 1980
- [2] Наредба № 55 за проектиране и строителство на железопътни линии, железопътни гари, железопътни прелези и други елементи от железопътната инфраструктура (Обн. ДВ. бр.18 от 5 Март 2004г)

RESEARCH OF THE CHANGE RATE OF UNCOMPENSATED CENTRIFUGAL ACCELERATION IN SPECIFIC POINTS OF SOME TYPES OF TRANSITION CURVES

Maya Ivanova, Nikolay Arnaudov
mai_5e@abv.bg, nikiarbg@mail.bg

University of Transport "Todor Kableshkov",
158 Geo Milev Stret, Sofia1574,
BULGARIA,

Key words: uncompensated centrifugal acceleration, transition curve, centripetal acceleration, ramp of cant

Abstract: Research of the change rate of uncompensated centrifugal acceleration of some types of transition curves has been made. And for that matter linear approximations and calculus methods have been used. The results have been compared with the limit values in the Bulgarian Regulations.