

**ПУТЬ И ПУТЕВОЕ ХОЗЯЙСТВО**

УДК 656.025.2

*П. В. КОВТУН, кандидат технических наук, Т. А. ДУБРОВСКАЯ, старший преподаватель, Н. Ю. ГУБЕНСКИЙ, магистрант, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

**АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ ДЛИН ПЕРЕХОДНЫХ КРИВЫХ ПРИ ВВЕДЕНИИ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА С НАКЛОНОМ КУЗОВА НА СУЩЕСТВУЮЩИХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГАХ**

Проблема повышения скоростей движения поездов на железной дороге является важной задачей, стоящей перед Белорусской железной дорогой. Одним из направлений повышения скоростей является применение подвижного состава с наклоном кузова. Применение подвижного состава с наклоном кузова типа Talgo позволяет увеличить скорость прохождения криволинейных участков на 8–12 % при составных кривых и малых радиусах и около 20 % – при одиночных кривых, однако влечет за собой изменение некоторых параметров плана линий. В частности, в статье анализируется, как изменятся длины переходных кривых при использовании подвижного состава с наклоном кузова.

**П**ереходные кривые необходимы для обеспечения динамически плавного перехода подвижного состава из прямого участка пути в кривые или из кривой одного радиуса (возвышения) в кривую другого радиуса (возвышения).

В пределах переходных кривых устраиваются совмещенный отвод кривизны, возвышения наружного рельса и уширения колеи.

Переходные кривые в плане представляют собой кривую переменного радиуса, уменьшающегося от  $\infty$  (бесконечно большого) до радиуса круговой кривой с уменьшением кривизны пропорционально изменению длины. Кривая, обладающая таким свойством, представляет собой радиоидальную спираль (клотоиду), уравнение которой выражается в виде ряда

$$y = \frac{x^3}{6C} \left( 1 + \frac{2x^4}{35C^2} + \frac{293x^8}{237000C^4} + \dots \right), \quad (1)$$

где  $C$  – параметр переходной кривой ( $C = lR$ );  $l$  – длина дуги.

Такие переходные кривые могут использоваться и на линиях с высокими скоростями движения пассажирских поездов.

Экипаж при входе в переходную кривую начинает направляться наружной рельсовой нитью в средней части переходной кривой, где кривизна становится более 1/650...1/750 м. «Эффективная длина» переходной кривой намного меньше ее фактической длины.

Уровень комфорта пассажиров при движении поезда в переходных кривых можно оценить исходя из трех факторов: поперечного ускорения, скорости изменения ускорения и скорости поворота тела вокруг продольной оси вагона. Величина некомпенсированного поперечного ускорения в переходных кривых больше, чем в круговых, и мало зависит от применения технологии наклона кузова вагона. Но скорость изменения ускорения в таком случае выше, поскольку выше и скорость движения поезда.

Известно, что увеличение угла наклона кузова вагона уменьшает величину поперечного ускорения при движении в кривых, но скорость поворота тела при этом возрастает. Насколько она увеличится, зависит от продолжительности нахождения вагона на переходной кривой.

Для усредненного случая прохождения переходной кривой за 3 секунды уровень комфорта стоящих пассажиров в вагонах с наклонными кузовами существенно снижается, и поэтому повышение скорости движения поезда из таких вагонов по сравнению с поездом из обычных вагонов при условии сохранения того же уровня комфорта ограничено на 25 %. Если переходные кривые короче и поезд проходит их, к примеру, за 2 секунды, возможность повышения скорости поезда из вагонов с наклоняемыми кузовами еще более проблематично [1].

В противоположность явлениям, возникающим при движении поезда в переходных кривых, которые можно рассматривать для каждой кривой в отдельности, головокружение имеет кумулятивный характер и обостряется в зависимости от индивидуальных показателей здоровья пассажиров, хотя полное представление об этих зависимостях окончательно не сформировано. Ясно только, что эффект головокружения накапливается и углубляется при большом числе следующих друг за другом кривых малого радиуса с короткими переходными кривыми. В связи с этим необходимо уточнить долю поперечного ускорения, подлежащую компенсации, и ввести в систему управления механизмом наклона кузова вагона алгоритм оптимизации угла наклона в каждой кривой.

Длины переходных кривых при существующем состоянии железнодорожных линий не всегда соответствуют требованиям исследований и требованиям Свода Правил. При применении подвижного состава с наклоном кузова ( $3,5^\circ$ ), который позволяет увеличить скорость движения на направлениях с большим количеством кривых без их переустройства, теоретически можно повысить скорость в кривых с малыми возвышениями наружного рельса на величину более 25 %. Но, с другой стороны, необходимо снижать скорость движения из-за превышения непогашенного ускорения кузова и скорости его изменения при преодолении переходной кривой. Этот факт может привести к тому, что система принудительного наклона не в полной мере себя оправдывает и увеличение скорости прохождения кривых может оказаться менее 20 %.

Одним из путей решения данной проблемы является переустройство пути, которое будет заключаться в

установлении необходимой длины переходной кривой до уровня, при котором время ее прохождения будет не меньше времени, складывающегося из времени на обнаружение начала кривого участка пути (времени нарастания непогашенного ускорения кузова вагона до порогового значения) и времени срабатывания механизма наклона (приведения кузова в наклонное положение).

Длина переходной кривой, необходимая для приведения кузова в наклонное положение, зависит не только от возвышения наружного рельса в круговой кривой (по стандартным методикам расчета), но и от порогового значения непогашенного ускорения и угла наклона кузова вагона (от постоянных величин для механизма наклона), а также радиуса круговой кривой и принятого допустимого значения непогашенного ускорения.

В профиле переходная кривая в обычных условиях представляет собой наклонную линию с однообразным уклоном  $i = h / l_{\text{пер}}$ .

На дорогах Германии, Франции, Японии и других стран используется криволинейный отвод возвышения наружной нити, преимущество которого – в наибольшей мере проявляется при высокоскоростном движении поездов.

Длины переходных кривых для подвижного состава с наклоном кузова частично регламентируются в [2]. При длине прямых вставок 25 м и менее, а также при их отсутствии:

а) при наличии переходных кривых и прямой вставки (для обратных кривых и кривых одного направления):  $[a_{\text{нп}}] = 0,7 \text{ м/с}^2$ ;  $[\psi] = 0,3 \text{ м/с}^3$ ;

б) при наличии переходных кривых и отсутствии прямой вставки:

– для обратных кривых:  $[a_{\text{нп}}] = 0,7 \text{ м/с}^2$ ;  $[\psi] = 0,6 \text{ м/с}^3$ ;  
– для кривых одного направления:  $[a_{\text{нп}}] = 0,7 \text{ м/с}^2$ ;  $[\psi] = 0,3 \text{ м/с}^3$ ;

в) при отсутствии переходных кривых и наличии или отсутствии прямой вставки:  $[a_{\text{нп}}] = 0,4 \text{ м/с}^2$ ;  $[\psi] = 0,3 \text{ м/с}^3$ .

Приведенные нормативы  $[a_{\text{нп}}]$  и  $[\psi]$  относятся ко всем типам подвижного состава, включая скоростной и высокоскоростной подвижной состав, в том числе электропоезда «Talgo» и «Ласточка». При этом электропоезд «Talgo» должен эксплуатироваться по таким сопряжениям кривых в режиме без наклона кузова.

Для скоростных электропоездов с наклоном кузова («Talgo») при длине прямых вставок более 25 м и в несопряженных кривых:

– при наличии переходных кривых и прямых вставок длиной 26–50 м:  $[a_{\text{нп}}] = 0,7 \text{ м/с}^2$ ;  $[\psi] = 0,6 \text{ м/с}^3$ . В этом случае электропоезд «Talgo» должен эксплуатироваться в режиме без наклона кузова;

– при наличии переходных кривых и прямых вставок длиной более 50 м:  $[a_{\text{нп}}] = 1,5 \text{ м/с}^2$ ;  $[\psi] = 0,9 \text{ м/с}^3$ . В этом случае электропоезд «Talgo» может эксплуатироваться в режиме с наклоном кузова;

– при отсутствии переходных кривых независимо от длины прямой вставки:  $[a_{\text{нп}}] = 0,4 \text{ м/с}^2$ ;  $[\psi] = 0,3 \text{ м/с}^3$ . В этом случае электропоезд «Talgo» должен эксплуатироваться в режиме без наклона кузова.

Длины переходных кривых принимаются исходя из следующих условий:

1) обеспечение безопасности от схода колеса с рельсов при отводе возвышения;

2) отсутствие у пассажиров неприятных ощущений при входе и следовании по переходной кривой.

Предотвращение схода колес с рельсов внутренней нити при заклиненном вписывании экипажа и прямолинейном отводе возвышения гарантируется [3] соотношением

$$k_{\text{min}} > iL_{\text{max}},$$

где  $k_{\text{min}}$  – наименьший свес гребня колеса;  $L_{\text{max}}$  – наибольшая длина жесткой базы;  $i$  – уклон отвода возвышения.

При  $k_{\text{min}} = 30 \text{ мм}$  и  $L_{\text{max}} = 4,6 \text{ м}$  критический уклон равен 0,0065. Обычно принимается  $i = i_1 \leq 1 \text{ ‰}$ . При заданном  $h_0$  длина переходной кривой

$$l_{\text{пер}} = h_0 / i_1.$$

По второму ограничению исследованиями установлены [3] следующие критерии выбора длины переходных кривых:

$$\max\left(\frac{dh}{dt}\right) \leq f \text{ и } \max\left(\frac{da_{\text{н}}}{dt}\right) \leq \psi, \quad (2)$$

где  $a_{\text{н}}$  – горизонтальное непогашенное ускорение,  $\text{м/с}^2$ ;  $\psi$  – допустимое значение приращения непогашенных горизонтальных ускорений;  $f$  – допустимое значение скорости подъема колеса по наружному рельсу.

Из условий (2) следует

$$l_{\text{пер}} \geq \frac{h_0 v_{\text{max}}}{f} \text{ и } l_{\text{пер}} \geq \frac{a_{\text{н}}}{\psi}. \quad (3)$$

Значения  $\psi$  в зарубежной практике принимаются от 0,3 до 1,0  $\text{м/с}^3$ .

При изменении скорости от 100 до 250  $\text{км/ч}$   $f$  возрастает до 50  $\text{мм/с}$ . При  $v_{\text{max}} = 200 \text{ км/ч}$  расчетное значение  $f$  принимается равным 42  $\text{мм/с}$ .

Для вагонов с наклоном кузова длина переходных кривых исходя из отсутствия у пассажиров неприятных ощущений при входе и следовании по переходной кривой (3) определяется с учетом дополнительного угла наклона:

$$l_{\text{пер}} \geq \frac{(h_0 + S \sin \alpha) v_{\text{max}}}{f} \text{ и } l_{\text{пер}} \geq \frac{a_{\text{н}}}{\psi}. \quad (4)$$

Если за возвышение принимать величину  $h = 50, 100$  и  $150 \text{ мм}$ , при  $f = 42 \text{ мм/с}$ ,  $S = 1600 \text{ мм}$ ,  $\alpha = 0 \dots 3,5^\circ$ , то из формулы (4) можно определить максимальную длину переходной кривой,  $\text{м}$ , с учетом использования подвижного состава с наклоном кузова (таблица 1). На рисунке 1 показан график зависимости длины переходной кривой от скорости при различном угле наклона подвижного состава.

Анализ результатов расчета длины переходной кривой при использовании обычного подвижного состава и подвижного состава с наклоном кузова показывает, что ее длину рационально увеличивать (примерно в 2–3 раза) для сохранения уровня комфортабельности езды пассажиров при движении поезда в переходных кривых.

Таблица 1 – Длина переходной кривой для вагонов с наклоном кузова, м

Скорость, км/ч	Возвышение наружного рельса $h$ , мм					
	50		100		150	
	$\beta = 0^\circ$	$\beta = 3,5^\circ$	$\beta = 0^\circ$	$\beta = 3,5^\circ$	$\beta = 0^\circ$	$\beta = 3,5^\circ$
80	26	78	53	105	79	131
100	33	98	60	131	99	164
120	40	117	79	157	119	197
140	46	137	93	183	139	230
160	53	157	106	210	159	262
180	60	176	119	236	179	295
200	66	196	132	262	198	328

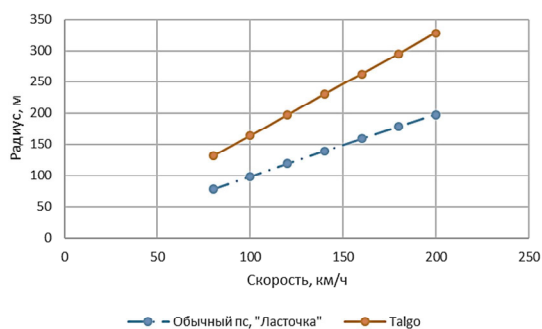


Рисунок 1 – Зависимость длины переходной кривой от скорости при различном угле наклона подвижного состава ( $h = 150$  мм)

#### Список литературы

1 Кантор, И. И. Высокоскоростные железнодорожные магистрали: трасса, подвижной состав, магнитный подвес / И. И. Кантор. – М. : Маршрут, 2004. – 51 с.

Получено 25.09.2019

**P. V. Kovtun, T. A. Dubrovskaya, N. Yu. Gubenskij.** Analysis of change of transition curve lengths at the introduction of a mobile composition with an inclined body on existing railways.

The problem of increasing train speeds on the railway is an important task facing the Belarusian Railway. One of the directions for increasing speeds is the use of rolling stock with a tilt of the body. The use of rolling stock with a tilt of the Talgo type body allows increasing the speed of passing curved sections by 8–12 % for composite curves and small radii and about 20 % for single curves, but entails a change in some parameters of the line plan. In particular, the article analyzes how to change the lengths of transition curves when using rolling stock with a tilt of the body.

2 Шахунянец, Г. М. Железнодорожный путь : учеб. для вузов ж.-д. трансп. / Г. М. Шахунянец. – М. : Транспорт, 1969. – 536 с.

3 Изыскания и проектирование железных дорог : учеб. – для вузов / И. В. Турбин [и др.] ; под ред. И. В. Турбина. – М. : Транспорт, 1989. – 479 с.

4 Карпушенко, Н. И. Возвышение наружного рельса и допускаемые скорости движения поездов в кривых [Текст] / Н. И. Карпушенко // Проблемы повышения скоростей движения поездов на Транссибирской магистрали : сб. науч. тр. – Новосибирск, 1999. – С. 7–15.

5 Курган, Н. Б. Определение объемов работ для снятия ограничений скорости, связанных с планом линии / Н. Б. Курган, Н. П. Хмелевская, С. Ю. Байдак // Сб. науч. тр. Дальневосточного гос. ун-та путей сообщения / под ред. В. С. Шварцфельда. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2014. – Вып. 2. – С. 52–62.

6 Смелянский, И. В. Совершенствование нормативов непогащенного ускорения и его приращения для современного подвижного состава при скоростном движении : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.06 / И. В. Смелянский ; Моск. ин-т инж. ж.-д. трансп., 2008. – 208 с.

7 О внесении дополнения в приказ от 02.07.2013 № 231Н. БелЖД от 03.03.2018 № 206НЗ.

8 Об установлении допускаемых скоростей движения поездов на Белорусской железной дороге : приказ Белорусской железной дороги от 02 июля 2013 г. № 231Н. – Минск, 2013.

9 СТП 09150.56.010–2005. Текущее содержание железнодорожного пути. Технические требования и организация работ. Стандарт организации. – Введ. 2006.07.01. – Минск, 2006. – 284 с.

10 Поезда с наклоняемыми кузовами для скоростного пассажирского движения / В. И. Омеляненко [и др.] // Локомотивинформ. – Харьков : Техностандарт. – 2008. – № 5. – С. 12–17.

11 Ерицян, Б. Х. Критерии и ограничения для определения угла наклона кузова скоростного электроподвижного состава / Б. Х. Ерицян // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2016. – № 2. – С. 52–60.