

УДК 625.113:656.224.027.3

Курган Н.Б., Гусак М.А., Найдёнова В.А., Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, Днепропетровск, Украина

ПЕРЕУСТРОЙСТВО КРИВЫХ ДЛЯ ВВЕДЕНИЯ СКОРОСТНОГО ДВИЖЕНИЯ ПАССАЖИРСКИХ ПОЕЗДОВ

Приведена методика определения рациональных параметров радиусов и переходных кривых, обеспечивающих максимально допустимую скорость при минимальных затратах на реконструкцию плана.

Ключевые слова: максимальная скорость, радиус кривой, параметр переходной кривой, смещение оси пути.

Kurgan N., Gusak M., Naydenova A., Dnepropetrovsk national university of railway transport named after academician V. Lazaryan, Ukraine

RECONSTRUCTION OF CURVES FOR INTRODUCTION OF HIGH-SPEED MOVEMENT OF PASSENGER TRAINS

The technique of an establishment of rational parameters of radiuses and transitive curves which provide as much as possible admissible speed at the minimum expenses for plan reconstruction is resulted.

Key words: the maximum speed, curve radius, parameter of a transitive curve, displacement of an axis of a way.

1. Постановка задачи

Одним из основных направлений реализации Стратегии развития железнодорожного транспорта на период до 2020 г. является поэтапное внедрение скоростного движения пассажирских поездов [1]. Допустимый уровень скорости определяют, как правило, параметры кривых в плане.

Например, на направлении Киев – Львов максимальную скорость 160 км/ч ограничивают 187 кривых. Возникает вопрос о возможности и целесообразности переустройства определенного количества кривых. Рекомендаций ДБН В.2.3-19-2008 по этому поводу такие «Величину радиусов кривых в плане устанавливают в каждом конкретном случае в зависимости от скорости движения поездов и значений радиусов кривых существующего пути». Чтобы получить более конкретные решения, были проведены дополнительные исследования.

Еще в 70-х гг. прошлого века профессор А.И. Иоаннисян в работе «Улучшение трассы существующих железных дорог» [2] поставил вопрос: что лучше – принять больший радиус, но меньшую переходную кривую, или меньший радиус и большую длину переходной кривой при условии обеспечения максимальной установленной скорости?

Известно, что увеличение радиуса приводит к смещению оси пути. В меньшей степени наблюдается смещение оси при удлинении переходных кривых. Возникла потребность исследовать, каким образом все это отражается на объемах работ, стоимости переустройства кривых и на динамических показателях взаимодействия подвижного состава и пути.

2. Методика исследования

Смещение Δ при увеличении радиуса от $R_{\text{сущ}}$ до $R_{\text{пр}}$ равна разности биссектрис $\Delta R = B_{\text{пр}} - B_{\text{сущ}}$ и разнице сдвигов от переходных кривых $\Delta I = P_{\text{пр}} - P_{\text{сущ}}$, т.е.

$$\Delta = (B_{\text{пр}} + p_{\text{пр}}) - (B_{\text{сущ}} + p_{\text{сущ}})$$

или

$$\Delta = \left[R_{\text{пр}} \left(\sec \frac{\alpha}{2} - 1 \right) + \frac{l_{\text{пр}}^2}{24 R_{\text{пр}}} \right] - \left[R_{\text{сущ}} \left(\sec \frac{\alpha}{2} - 1 \right) + \frac{l_{\text{сущ}}^2}{24 R_{\text{сущ}}} \right]$$

После преобразований получим

$$\Delta = \Delta R \left(\sec \frac{\alpha}{2} - 1 \right) + \frac{R_{\text{сущ}} (l_{\text{пр}}^2 - l_{\text{сущ}}^2) - l_{\text{сущ}}^2 \Delta R}{24 R_{\text{сущ}} (R_{\text{сущ}} + \Delta R)} \quad (1)$$

Выясним, какая доля смещения формируется за счет изменения радиуса и какая – за счет удлинения переходных кривых. Известно, что переходная кривая представляет собой радиоидальную спираль, уравнение которой $\rho = \frac{C}{S}$. В этом уравнении C представляет собой постоянную величину и называется

параметром переходной кривой. При $\rho = R, S = L$ параметр переходной кривой $C = R \cdot L$.

Для кривых с углом поворота 20, 40 и 60° были определены смещения оси пути по формуле (1) и построены графики $\Delta = f(C)$ (рис. 1).

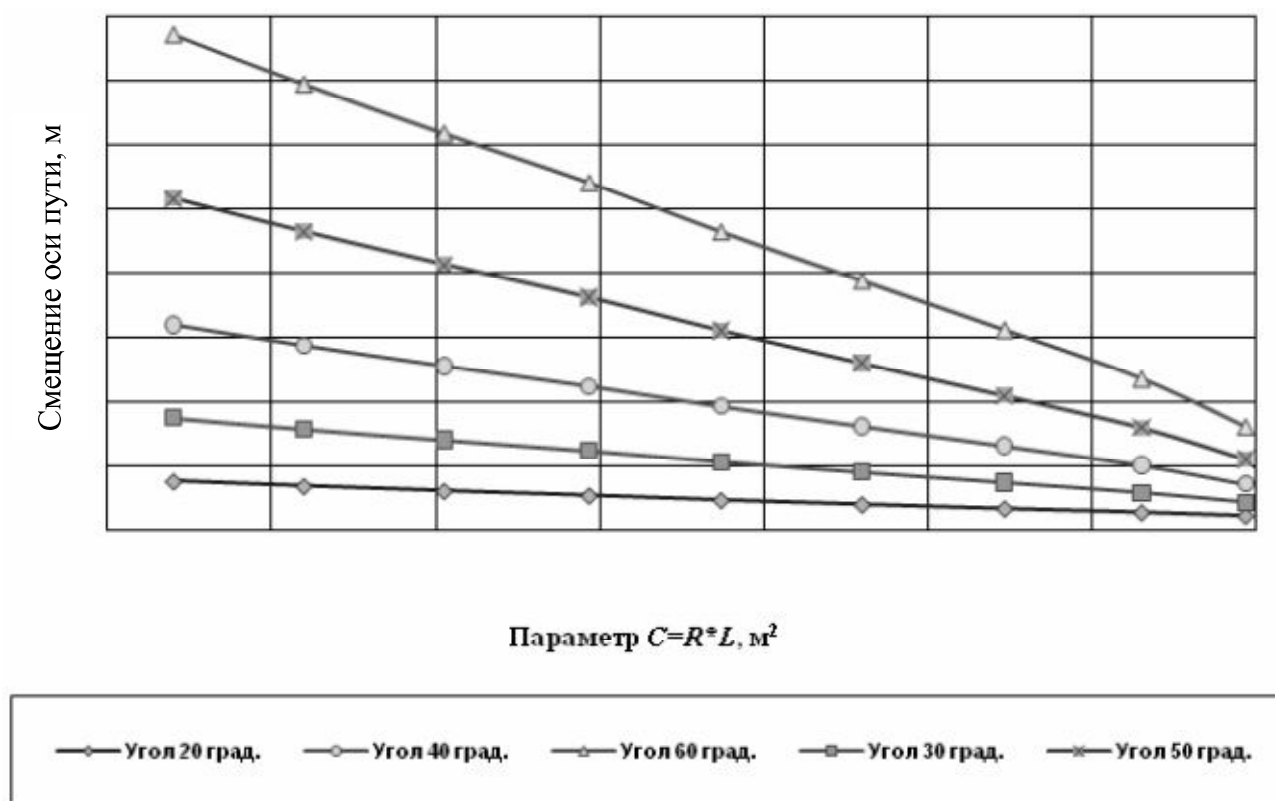


Рис. 1. Зависимость смещения оси пути от параметра C и угла α

Из рис. 1 видно, что величина смещения оси тем меньше, чем меньше угол поворота и больший параметр переходной кривой C . Доля влияния длины переходной кривой на величину смещения зависит также от угла поворота α и параметра C (рис. 2), то есть смещение оси от удлинения переходных кривых Δl тем больше, чем меньше угол поворота и чем больше параметр C .

Если параметр кривой C устанавливается при условии обеспечения максимально допустимой скорости $V_{\max}$, то имеет место следующее соотношение: $C_{R_1}^{V_{\max}} > C_{R_2}^{V_{\max}} > \dots > C_{R_n}^{V_{\max}}$, (где $R_1 < R_2 < \dots < R_n$), то есть параметр C имеет большие значения при меньших проектных радиусах, но длинных переходных кривых и возрастает при увеличении угла поворота кривой. В этом случае при углах поворота 20, 30 и 40° доля переходной кривой в формировании общего смещения оси пути при переустройстве кривых составляет от 51,6 до 22,6 и 12,4% соответственно (радиус 1200 м, переходная кривая 220 м), или 23,6; 10,3 и 5,7% (радиус 1300 м, переходная кривая 200 м).

Доля влияния переходной кривой
на смещение оси пути. %

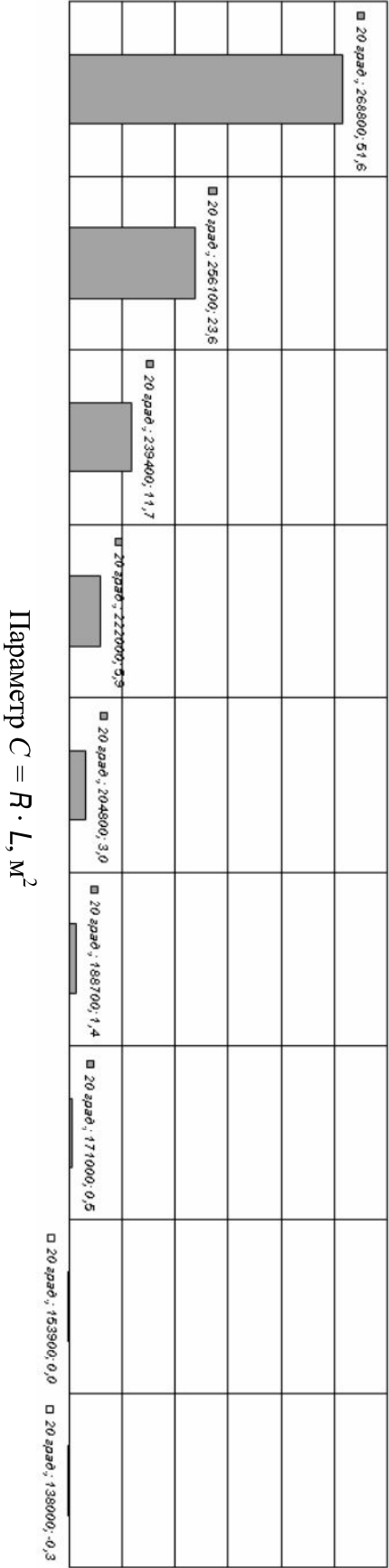


Рис. 2. Влияние переходной кривой в формировании общего смещения оси пути (угол поворота 20°)

Поставим вопрос, какой параметр C можно считать наиболее рациональным для обеспечения максимально установленной скорости на существующих участках железной дороги. Согласно графикам (рис. 3) $V_{\max} = 160$ км/ч можно обеспечить при $R_{\text{пр}} = 1400$ м только, если $C = 240000 \text{ м}^2$; при $R_{\text{пр}} = 1600$ м, если $C \geq 240000 \text{ м}^2$, при $R_{\text{пр}} = 1800$ м, если $C \geq 290000 \text{ м}^2$ и т.д. Доля влияния переходной кривой в формировании общего сдвига оси пути в приведенных примерах незначительна и определяется в основном величиной, зависящей от $\Delta R = R_{\text{пр}} - R_{\text{сущ}}$.

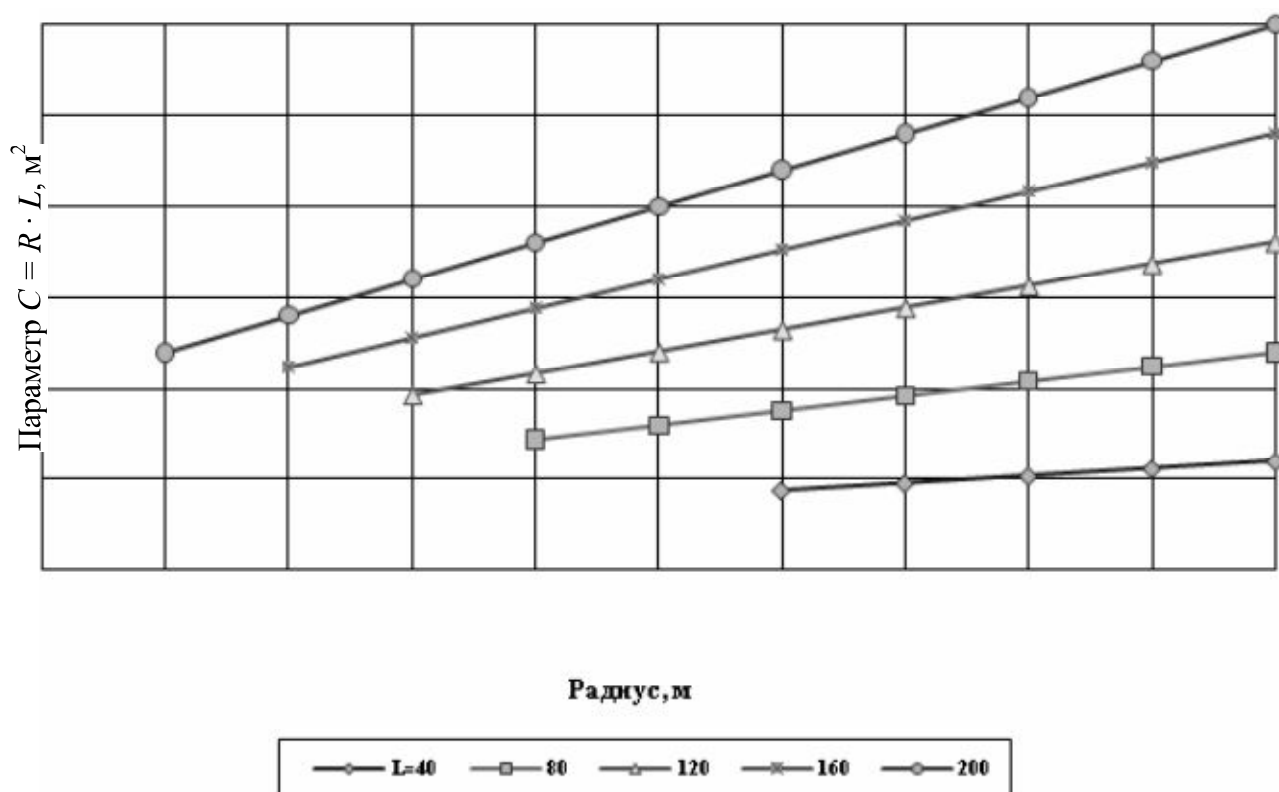


Рис. 3. Допустимые значения параметра C при $V_{\max} = 160$ км/ч

С использованием программы RWPlan и методики, которая предусматривает учет соответствующих работ по переустройству кривой [3], по формуле (2) была рассчитана стоимость по каждому варианту (рис. 4)

$$K = \sum_{i=1}^{i=4} a_i l_i + \sum_{i=5}^{i=7} a_i l_i + \sum_{i=8}^{i=10} a_i Q_i, \quad (2)$$

где $a_1, \dots, a_4$ – затраты на смещение оси существующего пути соответственно до 60 мм, 61–120 мм, 121–120 мм и более 250 мм; $l_1, \dots, l_4$ – длина участков с соответствующим диапазоном сдвигов; $a_5, \dots, a_7$ – расходы соответственно на перекладку верхнего строения пути, перенос контактных сети, устройств СЦБ; $l_5, \dots, l_7$ – длина участков перекладывания пути, перенос контактной сети, кабе-

лей СЦБ; $a_8, \dots, a_{10}$ – стоимость 1 м³ балласта, грунта для расширения существующего земляного полотна и грунта для отсыпки земляного полотна на новой трассе; $Q_8, \dots, Q_{10}$ – объем балласта и грунта для расширения существующего земляного полотна или для отсыпки нового земляного полотна.

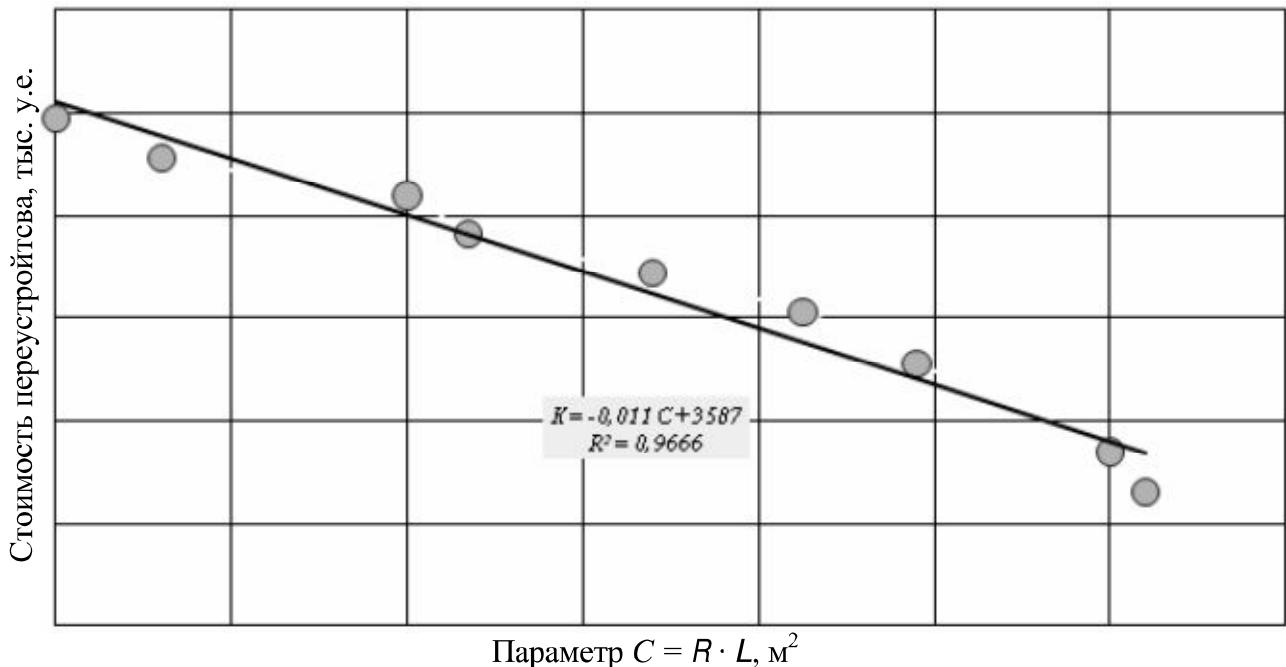


Рис. 4. Стоимость переустройства кривой в зависимости от параметра C (угол поворота 30°)

Из результатов расчетов, выполненных при разных значениях угла поворота, следует, что в кривых с углом 30° стоимость переустройства кривых увеличивается в 2,3...3,3 раза по сравнению с углом поворота 20°. В кривых с углом поворота 40° стоимость увеличивается соответственно в 4...5,9 раза.

Поэтому, рекомендации ДБН В.2.3-19-2008 по учету значений радиусов кривых существующего пути хотя и являются не конкретными, но правомерными.

Итак, при условии минимальной стоимости переустройства кривых желательно, чтобы $C \rightarrow \max$ при $R \rightarrow \min, L \rightarrow \max$. Рассмотрим этот вопрос с позиции динамики взаимодействия экипажей в кривых с различными параметрами.

Базовой принята модель пространственных колебаний скоростного пассажирского вагона [4]. Были установлены зависимости боковых Y_B , рамных сил Y_R , коэффициента горизонтальной динамики k_{GD} и других показателей от параметра C .

Для примера на рис. 5 и 6 приведены зависимости Y_R и k_{GD} от параметра C . Коэффициент горизонтальной динамики определяется как отношение максимальной рамной силы Y_R к статической нагрузке $P_{ст}$ колесных пар на рельсы

$$k_{GD} = \frac{Y_R}{P_{ст}} \leq 0,4. \quad (3)$$

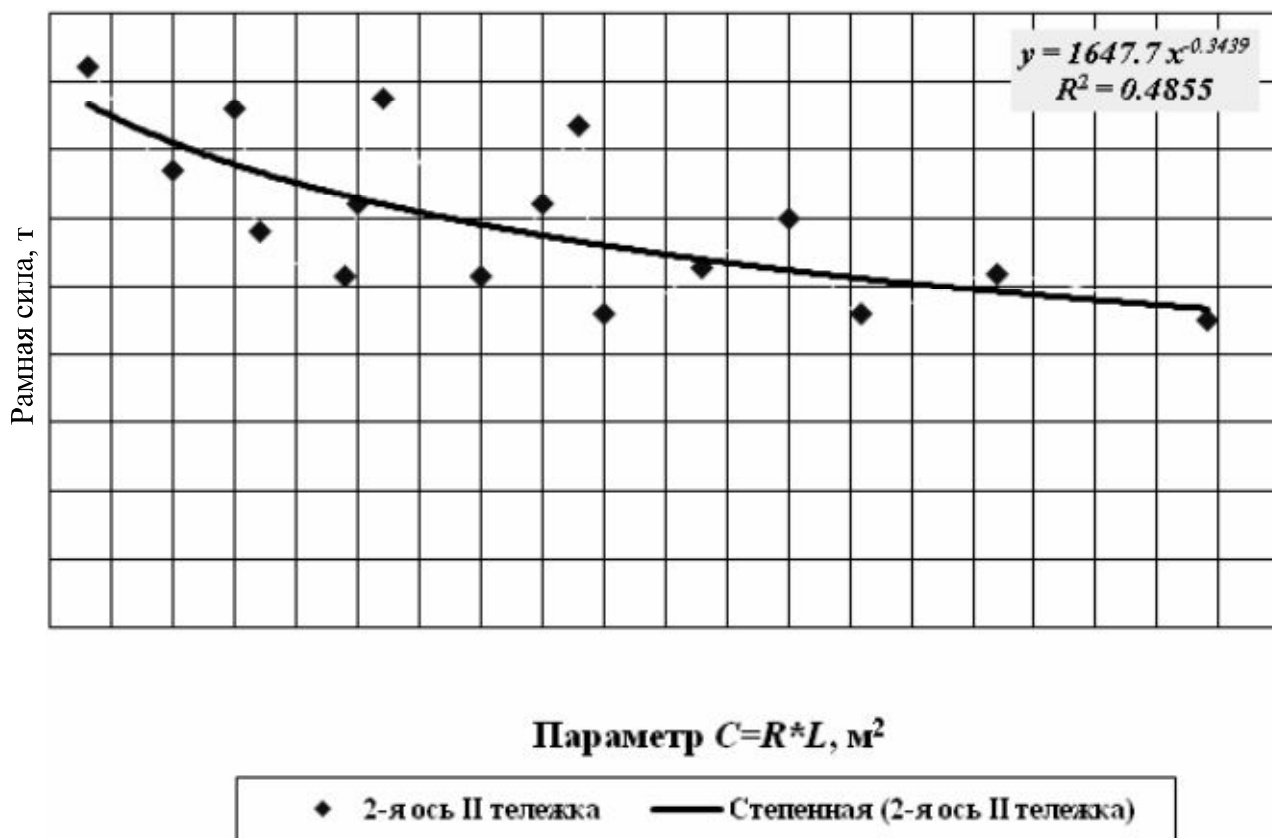


Рис. 5. Изменение величины рамной силы от параметра C

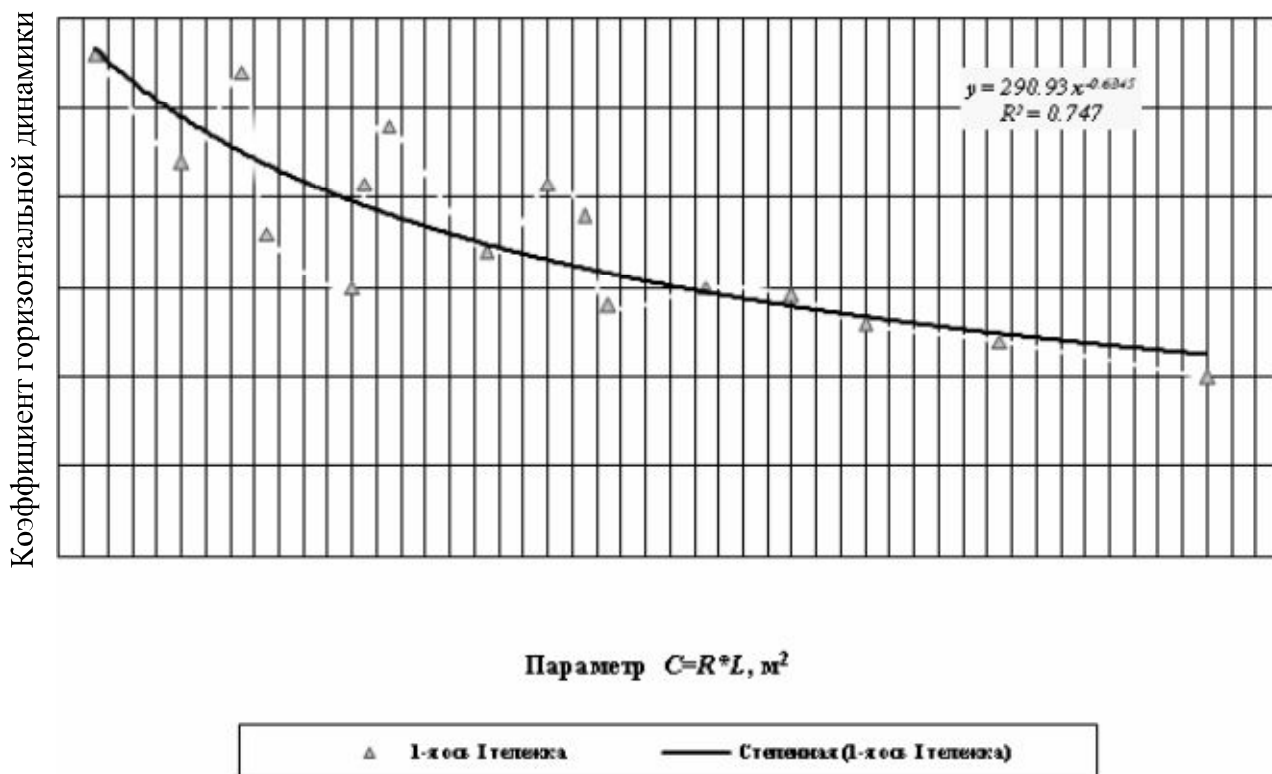


Рис. 6. Изменение коэффициента горизонтальной динамики от параметра C

Из рис. 6 видно, что при увеличении параметра с 50000 до 250000 м² коэффициент k_{GD} уменьшается от 0,28 до 0,12, то есть условие безопасности от поперечного смещения рельсошпальной решетки (3) выполняется и тем надежнее, чем больше параметр C .

Анализ таких графиков позволяет сделать вывод в пользу принятия большего параметра C , так как просматривается тенденция к уменьшения как боковых, так и рамных сил при его росте.

3. Реализация предложенной методики

Применения предложенной методики рассматривается на примере перегона Максимовна – Борки Великие Львовской железной дороги. По результатам тяговых расчетов (электровоз ДС3, масса подвижного состава 600 т) построена кривая скорости движения $V = f(S)$ (рис. 7). Из анализа кривой $V = f(S)$ видно, что максимальная скорость 160 км/ч не реализуется по двум причинам: во-первых, из-за недостаточности параметра C при наличии на 1312 км кривой радиусом $R_{сущ} = 1050$ м с переходными $L_1 = L_2 = 90$ м; во-вторых, при наличии на участке 1312-й км – 1314-й км подъема около 6‰ в четном направлении.

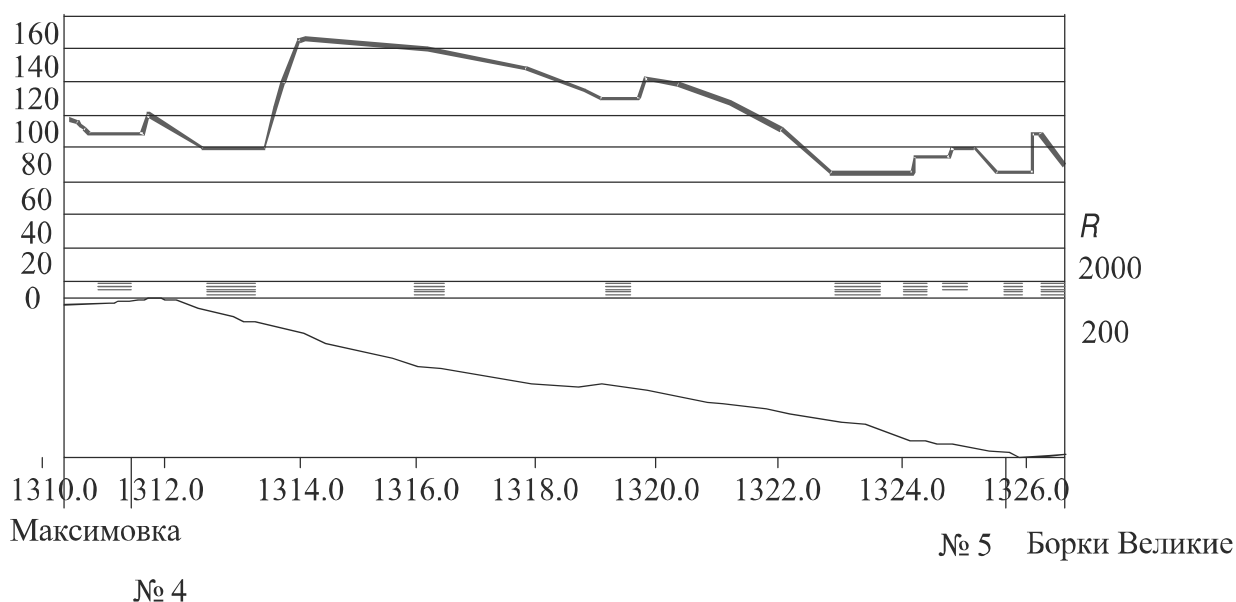


Рис. 7. Кривая скорости движения пассажирского поезда (электровоз ДС3, масса 600 т) на перегоне Максимовка – Борки Великие (четное направление)

Безусловно, наиболее весомым фактором является первый. Институтом «Киевгипротранс» в работе [4] предложено увеличить радиус до $R_{пр} = 1500$ м с переходными $L_1 = L_2 = 220$ м при максимальном смещении оси пути около 6 м.

Возникает вопрос, можно ли считать такое решение оптимальным. Чтобы на него ответить, ДИИТом были выполнены расчеты для следующих условий (1–4):

- 1) максимальная скорость на перегоне 160 км/ч;
- 2) непогашенное ускорение пассажирских поездов $[\alpha_{нп}]_{пас} = 0,7$ и $1,0$ м/с²;

3) непогашенное ускорение грузовых поездов, следующих с минимальной скоростью $[\alpha_{нп}]_{мин} = -0,3$ м/с²;

4) смещение оси существующего пути в пределах полосы отвода $S \leq 15$ м. Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Из Правил [6] известно, что на выбор проектных параметров кривой влияют не только максимальная скорость пассажирских поездов, но и минимальная скорость грузовых. Согласно ПТР [7] грузовой поезд с электровозом ВЛ80 может двигаться при полном (нормальном) возбуждении тяговых двигателей на 29-й и 25-й позициях. В первом случае скорость в конце подъема составляет 60 км/ч, во втором – 45 км/ч (рис. 8). При таких скоростях грузового поезда, минимальный радиус кривой может находиться в диапазоне 1700–1820 м при длине переходных кривых соответственно 100 и 80 м. При этом смещение оси существующего пути составит 6,4–7,6 м.

Таблица 1. Результаты переустройства кривых

Минимальная скорость грузового поезда $V_{\min}$, км/ч	Проектный радиус $R_{\text{пр}}$, м	Длина переходной кривой L , м	Параметр переходной кривой $C = R \cdot L$, м ²	Смещение оси пути S , м
Непогашенное ускорение: для пассажирских поездов $[\alpha_{\text{нп}}]_{\text{пас}} = 0,7 \text{ м/с}^2$, для грузовых $[\alpha_{\text{нп}}]_{\text{мин}} = -0,3 \text{ м/с}^2$				
45	1820	80	145600	7,6
60	1700	100	170000	6,4
75	1550	120	186000	4,9
90	1350	160	216000	3,2
Непогашенное ускорение: для пассажирских поездов $[\alpha_{\text{нп}}]_{\text{пас}} = 1,0 \text{ м/с}^2$, для грузовых $[\alpha_{\text{нп}}]_{\text{мин}} = -0,3 \text{ м/с}^2$				
45	1400	90	126000	3,2
60	1310	110	144100	2,3
75	1200	140	168000	1,3
90	1100	180	198000	0,7

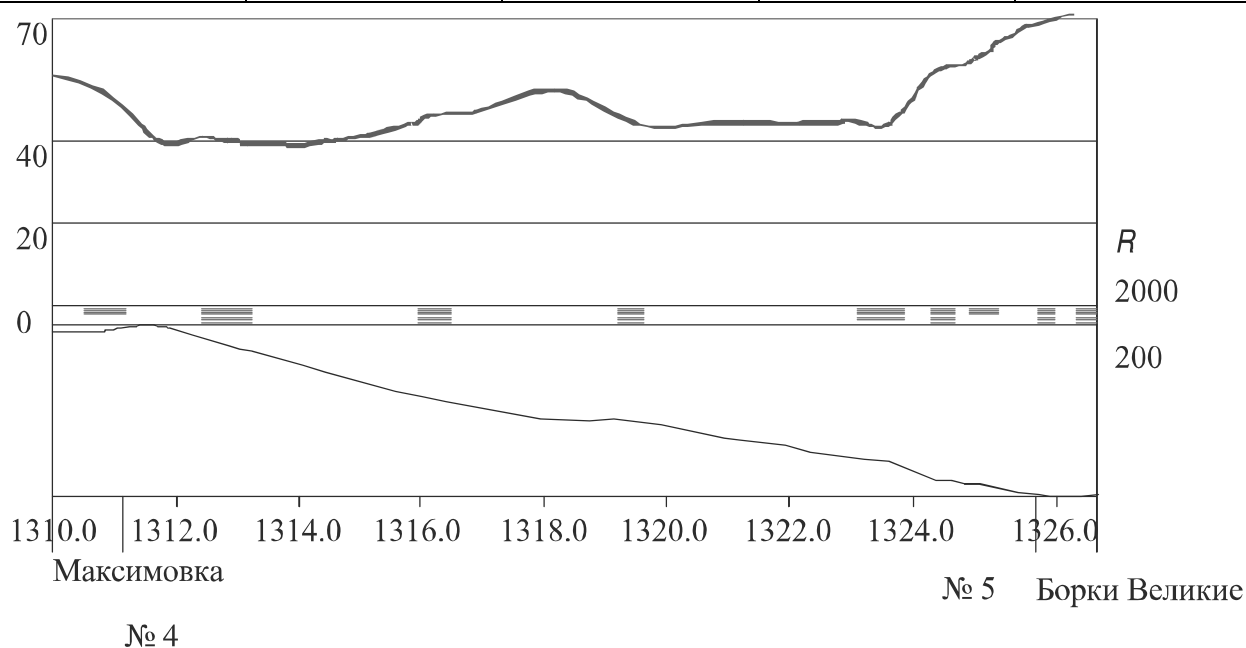


Рис. 8. Кривая скорости движения грузового поезда (электровоз ВЛ80, $Q = 2800$ т, 25 поз.) на перегоне Максимовка – Борки Великие (четное направление)

Для уменьшения объемов работ, а следовательно и стоимости реконструкции, можно предложить увеличить норматив непогашенного ускорения для пассажирских поездов до $1,0 \text{ м/с}^2$. В таком случае минимальный радиус кривой будет 1310–1400 м при длине переходных кривых соответственно 110–90 м.

При выполнении условий (1–4) каждому конкретному радиусу соответствует определенная длина переходной кривой. Были построены и проанализированы графики зависимости смещения оси пути S от параметра C (рис. 9, 10).

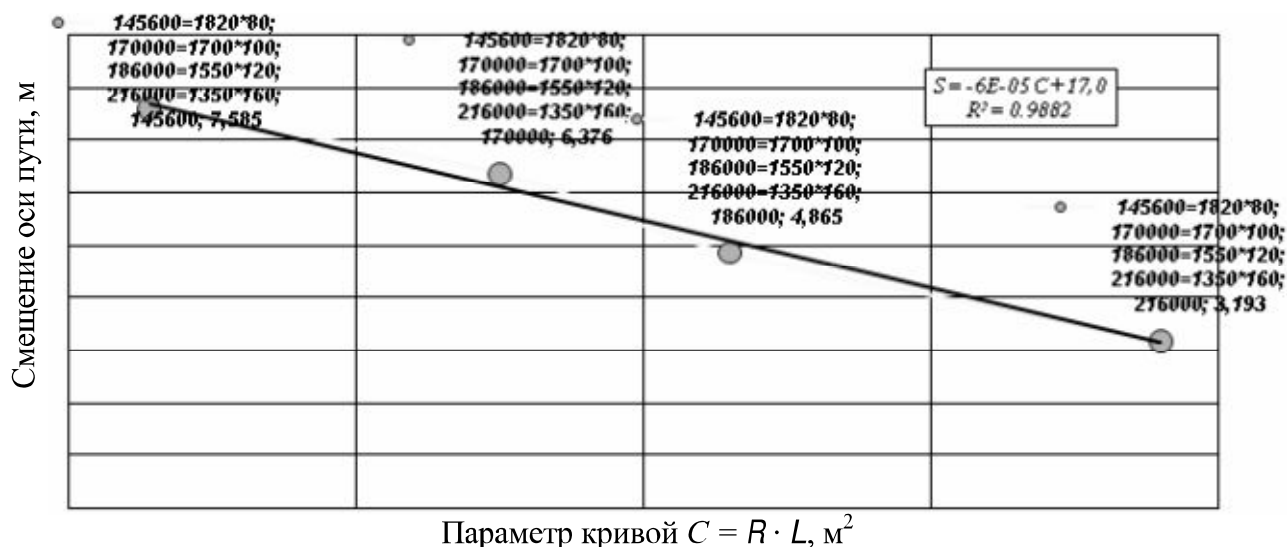


Рис. 9. Смещение оси пути при переустройстве кривой на перегоне Максимовка – Борки Великие, км 1320-й (скорость 160 км/год, $[\alpha_{\text{нп}}]_{\text{пас}} = 0,7 \text{ м/с}^2$, $[\alpha_{\text{нп}}]_{\text{мин}} = -0,3 \text{ м/с}^2$)

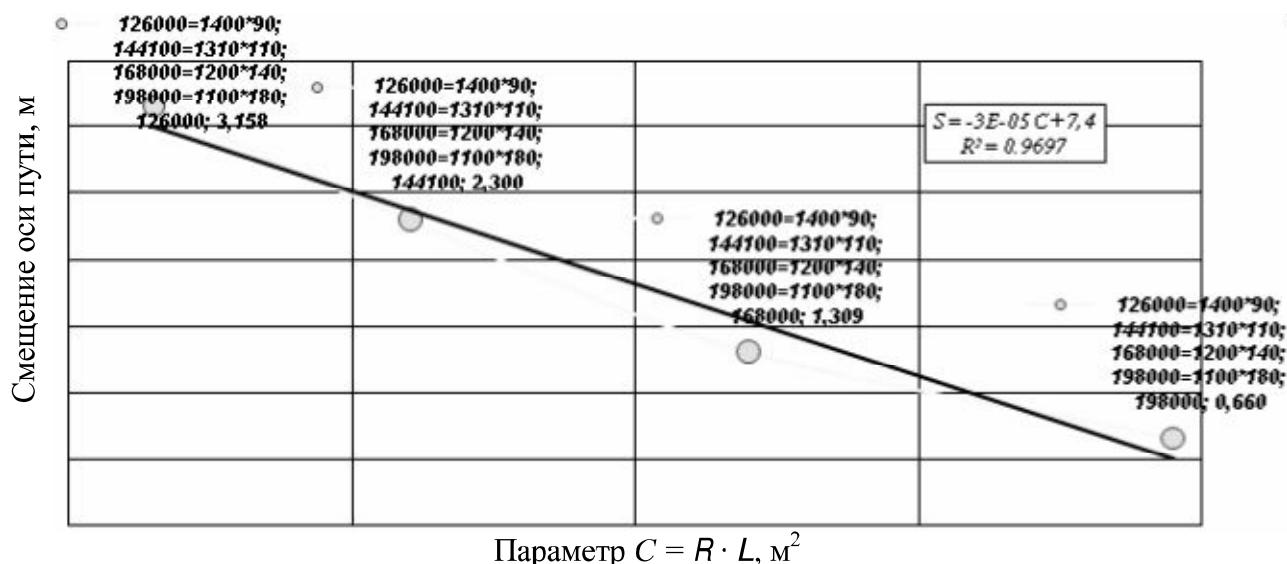


Рис. 10 Смещение оси пути при переустройстве кривой на перегоне Максимовка – Борки Великие, км 1320-й (скорость 160 км/ч, $[\alpha_{\text{нп}}]_{\text{пас}} = 1,0 \text{ м/с}^2$, $[\alpha_{\text{нп}}]_{\text{мин}} = -0,3 \text{ м/с}^2$)

Из рисунков следует, что при увеличении параметра C уменьшается смещение оси существующего пути, а следовательно и затраты на переустройство кривых, что подтверждено расчетами (табл. 2, рис. 11).

Таблица 2. Расходы на переустройство кривых при различных проектных параметрах

R , м	L , м	C , м ²	Расходы, тыс. у.е.	Расходы, %
1350	160	216000	160,261	100,0
1550	120	186000	220,274	137,4
1700	100	170000	275,736	172,1
1820	80	145600	324,41	202,4

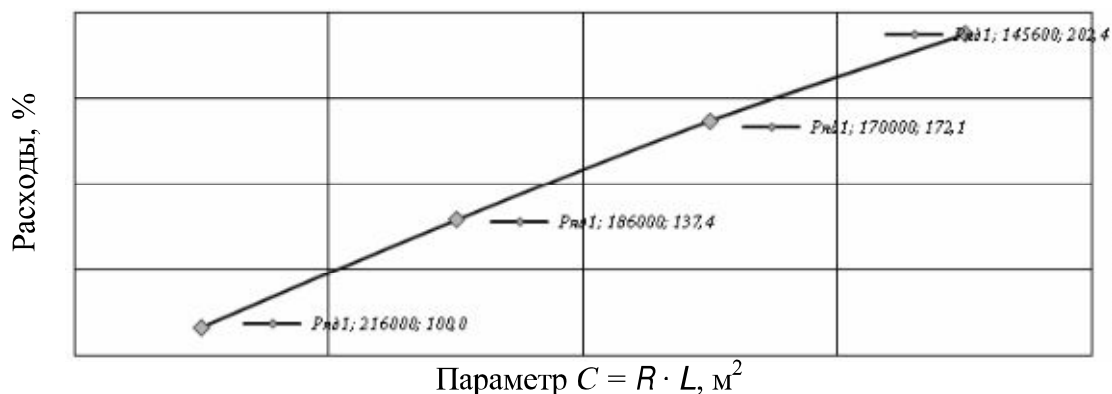


Рис. 11. Зависимость расходов на переустройство кривых от параметра C

Вывод

1. При разграничении грузового и пассажирского движения и специализации направлений для перевозок меняются скорости движения, параметры поездопотоков, что вызывает необходимость в корректировке параметров кривых при реконструкции плана линии.

2. Применение разработанной в ДИИТе методики позволяет определять такие параметры кривых, которые обеспечивают максимально допустимую скорость при минимальных затратах на переустройство кривых и рациональных динамических показателей взаимодействия подвижного состава и пути в таких кривых.

Список литературы

1. Транспортна стратегія України на період до 2020 року. — К., 2010. — 16 с.
2. Иоаннисян А.И. Улучшение трассы существующих железных дорог / А.И. Иоаннисян. — М., Транспорт, 1972.
3. Корженевич И.П. Обработка съемки и расчеты плана железнодорожных путей с помощью программы РВПлан / И.П. Корженевич. — 2009. — 30 с.
4. Данович В.Д. Математическая модель взаимодействия пути и пассажирского вагона при движении по участкам произвольной кривизны / В.Д. Данович, А.Г. Рейдемейстер, Н.В. Халипова // Транспорт : сб. науч. тр. ДИИТа. — Вып. 8. — Днепропетровск, 2001. — С. 124–138.
5. Перевлаштування колійної інфраструктури та залізничних мереж для впровадження швидкісного руху пасажирських поїздів на напрямку Київ — Львів, дільниця Підволочиськ — Львів. — К. : Київдіпротранс, 2007.

6. Правила визначення підвищення зовнішньої рейки і встановлення допустимих швидкостей в кривих ділянках колії: ЦП-0236 / М.Б. Курган, А.М. Орловський, О.М. Патласов, В.В. Циганенко, Д.М. Курган / затв. наказом Укрзалізниці від 14.12.2010 № 778-Ц. – К., 2010. – 52 с.

7. Правила тяговых расчетов для поездной работы. – М. : Транспорт, 1985. – 287 с.
УДК 625.111:528.71