

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(11) **039267**(13) **B1**

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ

(45) Дата публикации и выдачи патента
2021.12.24

(51) Int. Cl. **E01B 5/14** (2006.01)
B61F 5/38 (2006.01)

(21) Номер заявки
202100109

(22) Дата подачи заявки
2021.02.23

(54) ПЕРЕХОДНОЙ УЧАСТОК ЗАКРУГЛЕНИЯ КОЛЕИ РЕЛЬСОВОЙ ДОРОГИ

(43) **2021.12.22**

(56) SU-40396
AT-B-402211
US-A-4860666
US-3469784
JP-H03107002

(96) **2021/EA/0012 (BY) 2021.02.23**
(71)(72)(73) Заявитель, изобретатель и
патентовладелец:

**ВЕЛИЧКО ГЕННАДИЙ
ВИКТОРОВИЧ (BY)**

(74) Представитель:
**Беляева Е.Н., Беляев С.Б., Сапега
Л.Л. (BY)**

(57) Изобретение относится к устройству и эксплуатации переходного участка (далее по тексту ПУ) закругления рельсовой дороги, высокое качество поворотного движения экипажа по которому с заданной скоростью V при переменных по длине l кривизне оси его колеи $k(l)$ и ее поперечного уклона $i(l)$ обеспечивают новые закономерности его гармонизируемой формы. Форма оси колеи переходного участка определена местоположением N равноудаленных друг от друга точек с координатами $x[n]$ и $y[n]$, которые определены по формулам (1) и (2), переменные в которых, в свою очередь, определены по формулам (3)-(5). Поперечный уклон $i[n]$ колеи в этих точках определен по формуле (6), переменные в которой, в свою очередь, определены по формулам (7)-(9). Наряду с традиционно управляемым параметром L (длина переходного участка) в данное изобретение включена дополнительная возможность варьирования значениями управляемых параметров Z и U , которые оказывают влияние на итоговые геометрические свойства нетождественных функций угла, кривизны и поперечного уклона колеи ПУ.

B1**039267****039267****B1**

Данное изобретение относится к устройству и эксплуатации переходного участка (далее по тексту ПУ) закругления рельсовой дороги, высокое качество поворотного движения экипажа по которому с заданной скоростью V при переменных по длине l кривизне оси его колеи $k(l)$ и ее поперечного уклона $i(l)$ обеспечивают новые закономерности его гармонизируемой формы.

План трассы колеи рельсовой дороги (рельсового пути) состоит из чередующейся последовательности прямолинейных участков и закруглений, вписанных в углы их поворота. Каждое закругление состоит из кругового и двух переходных участков длиной L . Ось колеи кругового участка описана дугой окружности с заданной постоянной кривизной $K=1/R$, а ее наружный рельс возвышен над внутренним также на постоянную высоту D . Это позволяет частично уменьшить поперечное ускорение, действующее на круговой части закругления при расчетной скорости V . Это уменьшение достигается за счет направленного к центру его кривизны поперечного уклона $I=D/S$. В пределах круговой части закругления этот уклон также постоянен, так как на ее протяжении он зависит только от постоянной величины возвышения D и ширины колеи S . Постоянство значений параметров V , R , D и S в пределах круговой части закругления колеи обуславливает постоянство теоретически максимального на всем протяжении значения непогашенного поперечного ускорения (далее по тексту НПУ) $a_{\max}$. Согласованность значений параметров V , R , D и S предусматривает, что между обусловленным ими значением и его допустимым значением $a_{\text{доп}}$ соблюден баланс, который задан условием $a_{\max} \leq a_{\text{доп}}$. При этом НПУ $a_{\max}$ вычисляется как результат векторного сложения действующих в горизонтальной плоскости гравитационных G и центробежных C ускорений $a_{\max} = C - G \cdot \tan(\alpha)$, где α - это угол поперечного наклона колеи, вычисляемый как $\alpha = \arcsin(I)$.

В отличие от кругового участка закругления колеи ее переходной участок имеет более сложную форму. Она определяется видом функций кривизны $k(\chi)$ и поперечного уклона $i(\chi)$, изменяющихся в диапазоне $0 \leq k(\chi) \leq K$ и $0 \leq i(\chi) \leq I$ в зависимости от относительной доли текущей длины колеи $\chi = l/L$, непрерывно изменяющейся в диапазоне $0 \leq \chi \leq 1$. Функции большинства известных форм ПУ предшествующего уровня техники описаны в публикациях [1-4]. В каждой из них закономерность ее кривизны $k(\chi)$ и поперечного уклона $i(\chi)$ задана единообразно по принципу $k(\chi) = K \cdot f(\chi)$ и $i(\chi) = I \cdot f(\chi)$ с соблюдением требования $0 \leq f(\chi) \leq 1$. Этот принцип обусловил тождественность свойств графиков кривизны и поперечного уклона у подавляющего большинства известных форм ПУ предшествующего уровня техники. При этом основное различие между ними состоит в G^n порядке геометрической гладкости строго монотонных единичных функций $f(\chi)$. Он определяет максимальный порядок отличной от нуля n -й производной, которая в точках $\chi=0$ и $\chi=1$ имеет нулевые значения. У широко распространенной формы ПУ G^0 -го порядка гладкости функция $f(\chi) = \chi$. Поэтому графики закономерности ее кривизны $k(\chi)$ и поперечного уклона $i(\chi)$ представлены прямыми линиями $k(\chi) = \chi \cdot K$ и $i(\chi) = \chi \cdot I$. Закономерности относительных прямоугольных координат $x(\chi)$ и $y(\chi)$ горизонтальной проекции оси колеи такой формы ПУ соответствуют только одной плоской кривой, определяемой в уровне техники как клотоида, clothoid или spiral.

У всех остальных форм ПУ G^n -го порядка гладкости с $n > 0$ плавные очертания графиков закономерностей их кривизны $k(\chi)$ и поперечного уклона $i(\chi)$ подобны первой половине графика синусоиды. Это определило общее для их форм название half-sine, т.е. полусинусоидальные. При одном и том же порядке гладкости полусинусоидальные формы ПУ имеют различные закономерности функции $f(\chi)$. Они различаются по плавности, которая оценивается по максимуму их первой производной $df(\chi)/d\chi$, вычисляемому в точке $\chi=0.5$.

Устройство half-sine форм ПУ снижало остроту проблемы так называемого бокового рывка (lateral jerk), наблюдаемого в начале и в конце ПУ клотоидной формы. Однако в процессе их эксплуатации выявлялись проблемы качества движения, обусловленные низкочастотными колебаниями экипажей. На это указывают результаты исследований, проводимых в конце прошлого века в Японии на прямолинейных и криволинейных участках колеи скоростных рельсовых магистралей ПУ [5]. По мере повышения скоростей движения и развития высокоскоростных магистралей (далее ВСМ) актуальность проблем поворотного движения экипажа с переменной кривизной оси ПУ и с переменным поперечным уклоном его колеи возрастала. На это указывают современные тенденции к усложнению закономерностей half-sine форм ПУ таким образом, чтобы уменьшить значение максимумов первых производных их функций $df(\chi)/d\chi$ в их центральной части [3]. В дополнение к этому применяются также методы т.н. "приподнятого трассирования" [2, 3], при котором закономерность кривизны $k(\chi) = K \cdot f(\chi)$ определяет не ось колеи ПУ, а траекторию движения расчетной точки экипажа, которая "приподнята" над уровнем верха головок рельс (далее ВГР) на высоту H .

Как правило, все множество этих мер направлено на решение основной проблемы функционирования системы "Путь+Экипаж" (далее по тексту ПЭ), которая на ПУ закруглений рельсовых дорог проявляется в неблагоприятной динамике силового взаимодействия ее элементов и в снижении уровня удобства движения пассажиров. Из-за этого повышается темп расстройств геометрии колеи ПУ и смежных с ним участков, а также преждевременно изнашиваются рельсы и колеса экипажей. Степень деструктивности этих процессов в значительной мере зависит от геометрических свойств форм ПУ. Результаты анализа кинематических показателей системы ПЭ на ПУ с традиционными и наиболее прогрессивными фор-

мами [6] указывают на то, что каждой из них присущи те или иные недостатки, которые не обеспечивают требуемого качества криволинейного движения экипажей. Однако даже в стандарте стран ЕС нет теоретически обоснованных приоритетов выбора и применения какой-либо одной из 5-ти рекомендуемых в нем форм ПУ, которая обеспечивала бы наиболее высокий уровень качества функционирования системы ПЭ.

Существующие проблемы обоснования и практического применения подавляющего числа форм ПУ предшествующего уровня техники обусловлены недостаточно адекватными и крайне упрощенными моделями системы ПЭ и методами оценки качества ее функционирования. Как правило, они основаны на показателях кинематики абстрактной точки, расположенной на уровне ВГР. В отличие от этого положения данного изобретения основаны на показателях кинематики точек, расположенных на функционально значимых уровнях экипажа. В зависимости от характера перевозок и приоритетных аспектов качества расчетные уровни, на которых они могут быть расположены, учитывают положение центра масс экипажа (далее ЦМ) и/или положение вестибулярного аппарата его пассажира.

Такой подход согласуется с целью обеспечения того качества криволинейного движения экипажа, под которыми традиционно подразумевают приемлемый уровень комфорта пассажиров и плавное изменение сил взаимодействия колес экипажа с рельсами колеи. Однако для его обеспечения с применением любой из форм ПУ предшествующего уровня техники предоставлялась единственная возможность варьирования значениями только их длин L . К тому же упрощенная модель системы ПЭ не позволяла объективно оценивать влияние этого фактора на качество ее функционирования на этих участках.

Проведенные на железных дорогах Японии исследования показали, что дискомфорт и неблагоприятные последствия для здоровья пассажиров обусловлены низкочастотными колебаниями поперечных ускорений с частотой ниже 1 Гц [5]. Как показали результаты расчетов, полученные с применением описанной в статье [6] многофакторной детерминированной кинематической модели (далее МДКМ), такой характер колебаний поперечных ускорений, действующих на расчетном уровне экипажа $H > 0$, в различной мере присущ всем half-sine формам ПУ предшествующего уровня техники. На это указывают значительные амплитуды осцилляций значений свойственных им функций НПУ $a(l)$ и скоростей его изменения $\psi = da/dt$, переменных по длине l и времени t движения по ПУ. Эти же колебания приводят к неравномерному изменению сил реакции рельс, в результате чего возрастает динамическая составляющая действующей на них нагрузки.

Значения и закономерности этих показателей обусловлены сложным взаимодействием влияющих на них геометрических и физических факторов, наиболее важный результат которого проявляется и оценивается на расчетном уровне экипажа H . Этим обусловлен интегративный характер этих показателей, который существенно отличается от локальных показателей кинематики абстрактной точки, традиционно рассчитываемых и оцениваемых ранее на уровне ВГР=0. Сложное взаимодействие свойств системы ПЭ учтено в ее многофакторной детерминированной кинематической модели (далее МДКМ), описанной в статье [6]. Рассчитываемые в МДКМ интегративные показатели качества ее функционирования зависят от значений следующих параметров:

- скорости движения экипажа V ;
- радиуса круговой части закругления R ;
- расчетного возвышения наружного рельса над внутренним D ;
- расстояния между осями рельс колеи S ;
- возвышения H расчетной точки над уровнем ВГР;
- длины ПУ L ;
- закономерности угла $\beta(l)$ касательной к оси колеи и ее кривизны $k(l)$;
- закономерности отвода поперечного уклона колеи $i(l)$;
- закономерности кривизны проекции траектории движения расчетной точки $k_H(l)$ на горизонтальную плоскость;
- значения булевой переменной устанавливаемого в зависимости от симметричного (true) или асимметричного (false) отвода возвышения наружного рельса над внутренним;
- закономерности кривизны проекции оси колеи на вертикальную плоскость закономерности кривизны проекции продольной оси наружного (левого) рельса на вертикальную плоскость $k_L(l)$;
- закономерности кривизны проекции продольной оси внутреннего (правого) рельса на вертикальную плоскость $k_R(l)$;

Как показал анализ результатов, полученных с применением МДКМ [6], варьирование в приемлемом диапазоне значениями только длин L ПУ предшествующего уровня техники не позволяет согласовывать взаимодействие всех перечисленных выше свойств их half-sine форм таким образом, чтобы устранить или уменьшить амплитуды осцилляций свойственных им функций НПУ $a(l)$ и скоростей их изменения $\psi = da/dt$. Вследствие этого не представляется возможным также обеспечить равномерный и плавный рост разности сил реакции наружного и внутреннего рельсов колеи $\Delta F = F_L - F_R$.

Характер этих трудно устранимых недостатков, которые присущи half-sine формам ПУ предшествующего уровня техники, иллюстрирует пример оценки интегральных показателей качества одной из

наилучших форм ПУ [3], описанной функцией Order (3,7). Из перечня всех предложенных в [3] альтернатив она обладает наиболее высоким G^4 -м порядком гладкости. На графике 1-й производной функции отвода поперечного уклона колеи и кривизны ее оси присутствует характерное "плато" (см. фиг. 9). Это явно указывало на стремление автора этого решения устранить амплитуды осцилляций НПУ $a(l)$ и уменьшить максимум постоянной скорости его изменения $\psi_{\max}$ на значительном протяжении центральной части ПУ. Однако, как показал кинематический анализ функционирования системы ПЭ на ПУ такой формы, достижение этой цели приводит к существенной дисперсии этих показателей и других интегративных показателей качества движения в его начале и в конце (см. фиг. 10-13).

Таким образом, основными для оценки ПУ, полученных тем или иным методом, являются графики эпюр НПУ $a(l)$ и скорости его изменения $\psi(l)=da/dt$, действующих на расчетном уровне Н. Квазилинейный характер эпюры НПУ $a(l)$ является общепризнанным признаком высокого уровня качества конструкции ПУ, обеспечиваемого при условии гладкой и плавной эпюры скорости его изменения $\psi(l)=da/dt$ на подходах к ее центральному платообразному участку. Из этого следует, что комфорт движения пассажиров и положительная динамика силового взаимодействия элементов СПЭ должна быть обеспечена гладким и плавным изменением эпюр $a(l)$ и $\psi(l)$, действующих на тех расчетных уровнях экипажа, которые критичны для показателей всех аспектов качества его движения. Приоритет комфорта пассажиров обуславливает необходимость линеаризации эпюры $\psi(l)$ на большем протяжении центрального участка ПУ с минимальным отклонением постоянных максимальных значений $\psi_{\max}$ ее эпюры от абсолютного, но практически недостижимого минимума

$$\psi_{\min} \approx \frac{v}{L} \left(\frac{v^2}{R} - g \frac{D}{S} \right).$$

По совокупности общих технических признаков наиболее близкими к заявляемой форме ПУ закругления колеи рельсовой дороги является форма ПУ, описанная в изобретении "Railroad curve transition spiral design method based on control of vehicle banking motion" закономерностью Order (3, 7) [3]. В рамках предложенного там способа проектирования переходной кривой железнодорожного пути осуществляют выбор одного из 18-ти математических выражений, определяющих значение ускорения (т.е. вторую производную) угла поперечного уклона (крена) пути в зависимости от переменного расстояния, изменяющегося от нуля до заданной длины переходной кривой. В зависимости от выбранного математического выражения определяются геометрические свойства формы оси колеи ПУ с длиной L и ее поперечного уклона. Из-за отсутствия методики и функционально обоснованных критериев выбора необходимого математического выражения, назначения длины L ПУ, а также необходимых в ряде случаев значений дополнительных параметров, получаемая в рамках указанного изобретения форма переходного участка не обеспечивает исключение известных из уровня техники недостатков.

Для выявления этих недостатков и поиска путей их устранения за счет новой формы ПУ с соответствующими этой цели геометрическими свойствами была применена более совершенная кинематическая модель криволинейного движения экипажа с переменной кривизной оси колеи и ее поперечного уклона [6].

Результаты анализа форм ПУ, известных из предшествующего уровня техники [6], позволили сформулировать задачу настоящего изобретения в установлении таких закономерностей формы колеи и длины L ПУ закругления рельсовой дороги, соблюдение которых при ее проектировании и строительстве обеспечит достижение наивысшего уровня качества функционирования системы ПЭ при заданных значениях следующих ее параметров: скорости движения V , радиуса закругления R , возвышении наружного рельса над внутренним D , высоты H расположения расчетной точки экипажа над уровнем ВГ и расстояния между осями рельс S . Таким образом, технический результат заявляемого изобретения должен состоять в обеспечении наивысшего уровня качества функционирования системы ПЭ на ПУ закругления колеи рельсовой дороги при соблюдении расчетных значений ее параметров.

Поставленная задача решается, и указанные технические результаты достигаются заявляемым переходным участком закругления колеи рельсовой дороги, сопрягающим на длине L смежные с ним прямолинейный участок и круговую часть закругления с постоянным радиусом R , содержащим основание и формирующую колею рельсошпальную решетку, уложенную на нем в соответствии с координатами проекции точек оси переходного участка на горизонтальную плоскость с переменной по длине L величиной поперечного уклона i нормальной к оси линии, касательной к поверхности верха головок рельс, при этом форма оси колеи переходного участка определена местоположением N равноудаленных друг от друга точек с координатами $x[n]$ и $y[n]$, а поперечный уклон $i[n]$ колеи в этих точках изменяется вдоль оси переходного участка в диапазоне $0 \leq i[n] \leq D/S$, где D - расчетное возвышение наружного рельса колеи над внутренним в пределах круговой части оси закругления рельсовой дороги, а S - расстояние между вертикальными осями поперечного сечения рельс колеи, по мере равномерного наращивания на постоянную величину $\Delta l=L/(N-1)$ расстояния $l[n]$ до каждой ее n -й точки от $l[0]=0.0$ м в начале оси переходного участка и до $l[N-1]=L$ в его конце. Поставленная задача решается, и указанные технические результаты достигаются за счет того, что относительные прямоугольные координаты точек проекции оси колеи $x[n]$ и $y[n]$ определены по формулам

$$x[0] = 0.0; \quad x[n] = x[n-1] + \Delta_l \cdot \cos(\beta_b(\delta) + \Delta_\beta(\delta)) \quad (1)$$

$$y[0] = 0.0; \quad y[n] = y[n-1] + \Delta_l \cdot \sin(\beta_b(\delta) + \Delta_\beta(\delta)) \quad (2)$$

где

n - порядковый номер точки оси переходного участка, изменяющийся в диапазоне $1 \leq n \leq (N-1)$,

$x[n]$ - координата, характеризующая расстояние от начала переходного участка до места проекции n -й точки оси на линию, касательную к ней в точках $x[0]$ и $y[0]$,

$y[n]$ - координата, характеризующая смещение в сторону центра кривизны оси ее n -й точки, измеряемое по нормали от линии, касательной к ней в точках $x[0]$ и $y[0]$,

Δ_l - постоянная величина приращения текущей длины l оси колеи переходного участка, измеряемой по ее дуге от ее начала до каждой n -й точки,

δ - относительная доля текущей длины $l + \Delta_l/2$ оси колеи переходного участка, измеряемой от ее начала до середины отрезка оси, заключенного между ее смежными точками $n-1$ и n , вычисляемая по формуле

$$\delta = \frac{2n-1}{2(N-1)} \quad (3)$$

$\beta_b(\delta)$ - значение функции основного угла касательной к оси колеи переходного участка, вычисляемого в зависимости от относительной доли δ текущей длины $l + \Delta_l/2$ до точки касания по формуле

$$\beta_b(\delta) = \frac{L}{R} \delta^6 \left(\frac{315}{6} - \delta \left(\frac{2043}{7} - \delta \left(\frac{6720}{8} - \delta \left(\frac{14085}{9} - \delta \left(\frac{19795}{10} - \delta \left(\frac{18579}{11} - \delta \left(\frac{11178}{12} - \delta \left(\frac{3900}{13} - \frac{600}{14} \delta \right) \right) \right) \right) \right) \right) \right) \right) \right), \quad (4)$$

$\Delta_\beta(\delta)$ - значение функции дополнения к основному углу касательной к оси переходного участка, вычисляемой в зависимости от относительной доли δ текущей длины $l + \Delta_l/2$ до точки касания по формуле

$$\Delta_\beta(\delta) = U \frac{L}{R} \delta^6 \left(\frac{7}{6} - \delta \left(\frac{74}{7} - \delta \left(\frac{340}{8} - \delta \left(\frac{885}{9} - \delta \left(\frac{1425}{10} - \delta \left(\frac{1452}{11} - \delta \left(\frac{914}{12} - \delta \left(\frac{325}{13} - \frac{50}{14} \delta \right) \right) \right) \right) \right) \right) \right) \right), \quad (5)$$

где

U - параметр, определяющий величину дополнений к основным значениям угла касательной к оси колеи переходного участка в каждой ее точке с относительной долей δ текущей длины $l + \Delta_l/2$.

Поперечный уклон $i[n]$ колеи переходного участка в каждой n -й точке ее оси, изменяющейся в интервале $0 \leq n \leq (N-1)$, определен по формуле

$$i[n] = i_b(\chi) + \Delta_i(\chi) \quad (6)$$

где

χ - относительная доля текущей длины l оси колеи до точки n , вычисляемая как

$$\chi = \frac{n}{N-1} \quad (7)$$

$i_b(\chi)$ - значение функции основного поперечного уклона колеи переходного участка в точке n , вычисляемое в зависимости от относительной доли χ по формуле

$$i_b(\chi) = \frac{D}{S} \chi^4 \left(37 - \chi \left(102 - \chi \left(140 - \chi \left(172 - \chi \left(198 - \chi \left(154 - \chi (66 - 12\chi) \right) \right) \right) \right) \right) \right) \right) \quad (8)$$

$\Delta_i(\chi)$ - значение функции дополнения к основному поперечному уклону колеи в точке n , вычисляемое в зависимости от относительной доли χ по формуле

$$\Delta_i(\chi) = -Z \frac{D}{S} \chi^4 \left(1 - \chi \left(9 - \chi \left(35 - \chi \left(76 - \chi \left(99 - \chi \left(77 - \chi (33 - 6\chi) \right) \right) \right) \right) \right) \right) \quad (9)$$

где

Z - параметр, определяющий величину дополнений к основным значениям поперечного уклона колеи в каждой ее точке с относительной долей χ .

Востребованных практикой вариантов сочетания предопределенных значений параметров V , R , D , S и H системы ПЭ может быть очень много. Это существенно усложняет задачу обеспечения стабильно высокого уровня качества функционирования системы ПЭ при существенном различии вариантов сочетания их значений. Как показали результаты исследований [7], достижению наилучшей согласованности взаимодействия элементов системы ПЭ способствует корректировка итоговых значений геометрических свойств формы ПУ $\beta\left(\frac{l}{L}\right)$ и $i\left(\frac{l}{L}\right)$ за счет учитываемых в них дополнений $\Delta_\beta\left(\frac{l}{L}\right)$ и $\Delta_i\left(\frac{l}{L}\right)$. Величина этих дополнений зависит от разницы между текущим вариантом сочетания проектных значений параметров V , R , D , S и H и тем вариантом, который был учтен при обосновании функций основных (базовых) значений свойств формы ПУ $\beta_b\left(\frac{l}{L}\right)$ и $i_b\left(\frac{l}{L}\right)$.

Поэтому наряду с традиционно управляемым параметром L в данное изобретение включена дополнительная возможность варьирования значениями управляемых параметров Z и U , которые оказывают влияние на итоговые геометрические свойства нетождественных функций угла, кривизны и поперечного уклона колеи ПУ. В каждой точке его оси, удаленной от ее начала на расстояние l , это влияние реализуется за счет зависимости ее координат $x(l)$ и $y(l)$ от функции угла касательной к ней $\beta\left(\frac{l}{L}\right)$, состоящего из

вычисляемого по формуле (4) основного его значения $\beta_b\left(\frac{l}{L}\right)$, и зависящего от параметра U дополнения к нему $\Delta_p\left(\frac{l}{L}\right)$, которое вычисляется по формуле (5), а также за счет зависимости соответствующего этой точке текущего значения превышения $d(l)$ наружного рельса колеи над внутренним от функции поперечного уклона колеи $i\left(\frac{l}{L}\right)$, состоящего из вычисляемого по формуле (8) основного его значения $i_b\left(\frac{l}{L}\right)$, и зависящего от параметра Z дополнения к нему $\Delta_k\left(\frac{l}{L}\right)$, которое вычисляется по формуле (9).

Минимальные и максимальные степени членов полиномиальных функций (4), (5), (8) и (9), их коэффициенты, а также диапазоны варьирования значений управляемых параметров Z и U обоснованы с учетом обеспечения строгой монотонности G^4 -гладкой функции кривизны оси колеи, описываемой первой производной функции угла касательной к ней по длине ПУ $k\left(\frac{l}{L}\right) = d\left(\beta_b\left(\frac{l}{L}\right) + \Delta_p\left(\frac{l}{L}\right)\right)/dl$, и нетождественной ей G^3 -гладкой функции поперечного уклона колеи $i\left(\frac{l}{L}\right)$. При $\chi=l/L$ функция значений кривизны оси колеи $k(\chi)$ в каждой текущей координате длины l ПУ определена как

$$k(\chi) = k_b(\chi) + \Delta_k(\chi) \quad (10)$$

где

$$k_b(\chi) = \frac{L}{R} \chi^5 \left(315 - \chi \left(2043 - \chi \left(6720 - \chi \left(14085 - \chi \left(19795 - \chi \left(18579 - \chi \left(11178 - \chi \left(3900 - 600\chi \right) \right) \right) \right) \right) \right) \right) \right), \quad (11)$$

$$\Delta_k(\chi) = U \frac{L}{R} \chi^5 \left(7 - \chi \left(74 - \chi \left(340 - \chi \left(885 - \chi \left(1425 - \chi \left(1452 - \chi \left(914 - \chi \left(325 - 50\chi \right) \right) \right) \right) \right) \right) \right) \right), \quad (12)$$

U - параметр, определяющий максимальную величину дополнения к основному значению кривизны оси колеи переходного участка.

Такое математическое описание функций (4), (5), (8), (9), (11), (12) существенно расширяет возможности согласования взаимодействия всех свойств системы ПЭ в целях обеспечения стабильно высокого уровня качества ее функционирования при любом целесообразном варианте сочетания значений ее предопределенных V, R, D, H, S и управляемых L, Z, U параметров. Далее по тексту процесс достижения такой согласованности будет называться гармонизацией, получаемая в итоге форма ПУ будет называться гармонизированной, а соответствующие ей значения управляемых параметров L, Z и U будут называться оптимальными.

Квазилинейной G^1 гладкой и плавной эпюре НПУ $a(l)$, ассоциируемой с желаемым уровнем качества функционирования системы ПЭ на ПУ гармонизированной формы, должна соответствовать G^0 гладкая и плавная эпюра скорости его изменения $\psi(l) = da/dt$. Соблюдение этого требования исключает риск так называемого бокового рывка (англ.: lateral jerk), наблюдаемого в начале и в конце ПУ. При этом максимальное значение этой скорости на существенном протяжении центрального участка ПУ должно быть постоянным. При идеальном соблюдении этих требований очертания эпюры функции $\psi(l)$ будут подобны очертаниям равнобедренной трапеции со сглаженными углами и с достаточно протяженным "плато" в ее центральной части. Такие очертания в наибольшей мере способствуют наибольшему приближению линии "плато" с постоянными значениями $\psi_{\max}$ к абсолютному, но практически недостижимому минимуму $\psi_{\min}$. Это соответствует общепринятому мнению о достижении наивысшего уровня качества движения.

Известным из предшествующего уровня техники half-sine формам ПУ присущи низкочастотные осцилляции интегративных показателей кинематики на расчетном уровне экипажей H . На это указывают результаты их оценки с применением МДКМ [6]. Величина и частота амплитуд этих осцилляций обусловлены несогласованным взаимодействием тождественных свойств нелинейных закономерностей отвода поперечного уклона колеи и кривизны ее оси. Устройство ПУ с заявляемой в данном изобретении формой позволяет существенно уменьшить амплитуды этих осцилляций до практически незначимого уровня. При этом "постоянство" и степень приближения $\psi_{\max}$ к $\psi_{\min}$ в пределах "плато" эпюры $\psi(l)$ необходимо оценивать по дисперсии W скоростей изменения значений $d\psi/dt$ от соответствующей постоянству $\psi_{\max}$ нулевой скорости. Из этого следует, что синергический эффект, достигаемый при разных вариантах сочетания значений предопределенных V, R, D, H, S и управляемых L, Z, U параметров системы ПЭ, обратно пропорционален дисперсии W . С учетом этого цель поиска оптимальных значений параметров L, Z и U формализована как

$$\frac{1}{M} \sum_{\delta=\delta_b}^{\delta=\delta_e} \left(\frac{d\psi(\delta)}{dt} \right)^2 \Rightarrow \min \quad (13)$$

где δ_b - относительная доля начала "плато" эпюры функционала $\psi(l)$;

δ_e - относительная доля конца "плато" эпюры функционала $\psi(l)$;

M - количество равномерно распределенных на интервале от δ_b до δ_e точек с относительными долями длины δ , в которых численно оценивают амплитуду осцилляций значений функционала $d\psi/dt$.

По объективным причинам решение этой задачи не может компенсировать то негативное влияние,

которое может оказать закономерность вертикальной кривизны оси ПУ и/или асимметричный (см. фиг. 16, 17) отвод возвышения D. Поэтому функцию цели (13) следует минимизировать без учета этих факторов, т.е. при гипотетически нулевой вертикальной кривизне оси ПУ и симметричном методе отвода (см. фиг. 14, 15) возвышения D. Как показывают аналитические зависимости МДКМ [6], при симметричном отводе возвышения D в два раза уменьшается вертикальная кривизна эпюр высот по наружному и внутреннему рельсам, а ее противоположные знаки исключают влияние этой кривизны на ускорения, действующие по вертикальной оси экипажа. С учетом этих условий значения функционала $d\psi/dt$ в каждой относительной координате $\delta_b \leq \delta \leq \delta_e$ длины ПУ можно вычислять по упрощенной формуле

$$\frac{d\psi}{dt} = v^2 \left(\frac{d^2 k_H}{dl^2} v^2 - g \frac{d^2 i}{dl^2} \right) \quad (14)$$

где

k_H - функция кривизны траектории расчетной точки экипажа на расчетном уровне H.

Переменные значения параметров L, Z, U и предопределенные значения параметров V, R, D, H и S входят в уравнения функций, являющихся членами функционала (14). Это обеспечивает целенаправленность поиска оптимального варианта сочетания значений параметров L, Z и U, при котором дисперсии W амплитуд осцилляций, вычисленных по формуле (13), будут стремиться к минимуму. В соответствии с изложенными ранее обоснованиями это обеспечит наивысшее качество криволинейного движения экипажа, оцениваемое на уровне ЦМ или на каком-либо другом функционально значимом уровне экипажа.

В ходе проверки надежности и качества такой гармонизации форм ПУ было установлено, что при расчетных значениях НПУ $\alpha_{\max} \geq 0.4 \text{ м/с}^2$ минимизируемую дисперсию амплитуд осцилляций значений функционала $d\psi/dt$ следует оценивать в пределах "плато" эпюры $\psi(l)$, ограниченного точками с относительными долями длины ПУ $\delta_b = 1/4$ и $\delta_e = 3/4$. При значениях НПУ в диапазоне $0.1 \leq \alpha_{\max} < 0.4 \text{ м/с}^2$ эти относительные доли границы следует вычислять по эмпирическим формулам

$$\delta_b = \frac{1}{4} - \frac{2}{10} \left(3 \left(\frac{0.4 - \alpha_{\max}}{0.35} \right)^2 - 2 \left(\frac{0.4 - \alpha_{\max}}{0.35} \right)^3 \right) \quad (15)$$

$$\delta_e = \frac{3}{4} + \frac{2}{10} \left(3 \left(\frac{0.4 - \alpha_{\max}}{0.35} \right)^2 - 2 \left(\frac{0.4 - \alpha_{\max}}{0.35} \right)^3 \right) \quad (16)$$

В ходе этой проверки также было установлено, что для закруглений, обеспечивающих так называемый сбалансированный режим движения экипажей при $|\alpha_{\max}| \leq 0.1 \text{ м/с}^2$, требуется существенное увеличение длин ПУ [7]. Ввиду этого целесообразность практической реализации таких конструкций закруглений является крайне сомнительной и далеко не всегда осуществимой. В основном - из-за ограничений по углу поворота или по другим причинам. Поэтому минимальное расчетное значение НПУ $\alpha_{\max}$, при котором целесообразно гармонизировать форму ПУ, не должно быть меньше 0.1 м/с^2 .

Гармонизация формы ПУ может быть осуществлена путем "ручного" подбора комбинации близких к оптимуму значений L, Z и U. При этом следует иметь в виду, что при программной гармонизации форм ПУ с применением математически обоснованных методов минимум функционала (13) варьировал в диапазоне $1.0\text{E-}7 \leq W \leq 1.0\text{E-}4 \text{ м/с}^4$. Эти значения W актуальны для расчетной скорости движения экипажа, варьирующей в диапазоне $100 \leq V \leq 400 \text{ км/ч}$, радиусов закругления R, обеспечивающих расчетные значения НПУ $\alpha_{\max}$ в диапазоне $0.1 \leq \alpha_{\max} \leq 1.0 \text{ м/с}^2$ при расчетном возвышении наружного рельса над внутренним, варьирующем в диапазоне $25 \leq D \leq 150 \text{ мм}$, а также при расчетном уровне экипажа $H = 2200 \text{ мм}$ и ширине колеи $S = 1520 \text{ мм}$. При других условиях диапазон варьирования минимума функционала (13) может быть иным.

Однако даже для "ручной" гармонизации форм ПУ крайне желательно автоматизировать рутинные вычисления и построение эпюр, позволяющих контролировать эффективность этого процесса и качество его результатов. В идеале каждый шаг уточнения значений параметров L, Z или U должен приводить к минимизации численных значений функции цели (13), а также делать все более близкими к прямой эпюру НПУ $\alpha(l)$ и участок "плато" эпюры $\psi(l)$. В ходе работы над данным изобретением достаточно удобной и эффективной оказалась реализация этого процесса в программе Microsoft Excel. Наряду с численной оценкой степени гармонизации формы ПУ ее качество подтверждалось эпюрами всех геометрических и функциональных свойств системы ПЭ. Также в этой программе рассчитывались координаты и другие параметры, необходимые для разбивки закруглений с гармонизированными формами ПУ, соответствующими положениям данного изобретения.

Таким образом, в предпочтительных формах реализации заявляемого переходного участка при заданной величине параметра U, варьируемой в диапазоне от -45 до +55, значение суммы функций основ-

ного угла касательной к оси колеи $\beta_b \left(\frac{l}{L} \right)$ и дополнений к нему $\Delta_\beta \left(\frac{l}{L} \right)$ на всем протяжении длины L переходного участка строго монотонно и непрерывно изменяется от 0 до $L/2R$, значение ее первой производной по длине l, определяющей закономерность кривизны оси переходного участка $k \left(\frac{l}{L} \right) = d \left(\beta_b \left(\frac{l}{L} \right) + \Delta_\beta \left(\frac{l}{L} \right) \right) / dl$, также строго монотонно и непрерывно изменяется от 0 до $1/R$, а для суммы всех последующих 2-х, 3-х,

4-х и 5-х производных этих функций по этой же длине l обеспечивается непрерывность изменения их значений, а также равенство их нулю на обоих концах интервала $0 \leq l \leq L$. При этом функция кривизны оси колеи $k(\chi)$ определяется по приведенным выше формулам (10)-(12).

Также предпочтительными являются формы реализации заявляемого переходного участка, в которых при заданной величине параметра Z , варьируемой в диапазоне от -88 до +33, значение суммы функций основного поперечного уклона колеи $i_b\left(\frac{l}{L}\right)$ и дополнений к нему $\Delta_i\left(\frac{l}{L}\right)$ на всем протяжении длины L переходного участка строго монотонно и непрерывно изменяются от 0 до D/S , а значения ее 1-х, 2-х и 3-х производных по длине l непрерывно изменяются при соблюдении равенства их нулю на обоих концах интервала $0 \leq l \leq L$.

Следует отметить, что для применения заявляемого изобретения в современных технологиях автоматизированного проектирования рельсовых дорог более эффективна программная гармонизация форм ПУ с применением численного метода Ньютона. Основные положения необходимого для этого алгоритма и результаты его работы, иллюстрирующие преимущества заявляемого переходного участка закругления колеи рельсовой дороги будут рассмотрены далее более подробно на примерах некоторых предпочтительных, но не ограничивающих форм реализации со ссылками на позиции фигур чертежей, на которых схематично представлены

- фиг. 1 - план закругления колеи рельсовой дороги;
- фиг. 2 - схемы расчета действия гравитационных ускорений (G) на уровне ВГР криволинейного участка закругления колеи рельсовой дороги;
- фиг. 3 - схемы расчета действия центробежных ускорений (C) на уровне ВГР криволинейного участка закругления колеи рельсовой дороги;
- фиг. 4 - гравитационные составляющие ускорений и сил взаимодействия элементов системы ПЭ;
- фиг. 5 - центробежные составляющие ускорений и сил взаимодействия элементов системы ПЭ;
- фиг. 6 и 7 - суммарные векторы сил реакции рельс F_L и F_R , определяемые с учетом направления вектора НПУ $a_{\max}$ и силы F_C ;
- фиг. 8 - координатный метод описания кинематики расчетной точки экипажа M с учетом геометрических свойств формы ПУ;
- фиг. 9 - нормализованные графики функции Order (3, 7) и ее производных;
- фиг. 10 - графики кривизны $k(l)$ оси колеи и кривизны $k_H(l)$ траекторий движения расчетных точек;
- фиг. 11 - графики непогашенных поперечных ускорений $a(l)$, действующих на разных уровнях H расчетного экипажа;
- фиг. 12 - графики скоростей изменения непогашенных поперечных ускорений $a(l) \psi = da/dt$;
- фиг. 13 - графики сил реакции рельс и их разности;
- фиг. 14 - поперечное сечение колеи ПУ при симметричном отводе возвышения D ;
- фиг. 15 - диаграммы превышений рельс над продольным профилем оси ПУ при симметричном отводе возвышения D ;
- фиг. 16 - поперечное сечение колеи ПУ при асимметричном отводе возвышения D ;
- фиг. 17 - диаграммы превышений наружного рельса и обусловленных ими превышений оси ПУ над проектным профилем внутреннего рельса при асимметричном отводе возвышения D ;
- фиг. 18 - расчетная схема унифицированного метода вычисления прямоугольных координат n -й точки оси колеи ПУ в локальной системе тангенса закругления;
- фиг. 19 - графическое представление процесса минимизации функции цели гармонизируемой формы ПУ в соответствии с изобретением;
- фиг. 20-24 - пример геометрических и функциональных свойств системы ПЭ, обеспечиваемых гармонизированной формой ПУ по изобретению;
- фиг. 25 - пример зависимости оптимальных длин L гармонизированных форм ПУ от НПУ $a_{\max}$, расчетной скорости V и возвышений D , а также зависимости минимальных длин L клотоидных и рекомендованных [4] half-sine форм ПУ от аналогичной V скорости при $D=150$ мм и допустимой скорости подъема колеса по возвышению наружного рельса $\lambda=1/10$ км/ч;
- фиг. 26 - пример инвариантной к скорости V зависимости максимальных значений $\psi_{\max}$ гармонизированных форм ПУ от НПУ $a_{\max}$ и возвышений D ;
- фиг. 27 - пример инвариантной к скорости V зависимости сдвижек p круговых участков осей закруглений гармонизированных форм ПУ от НПУ $a_{\max}$ и возвышений D .

План трассы рельсовой колеи состоит из чередующейся последовательности прямолинейных участков 1 и закруглений, вписанных в углы их поворота. Каждое закругление (схематично представлено на фиг. 1) состоит из двух переходных участков (ПУ) 2 и расположенного между ними кругового участка 3 рельсовой колеи заданной кривизны $K=1/R$. При известной ширине колеи S радиус его оси R согласован с расчетными значениями: скорости движения экипажей V , возвышения наружного рельса над внутренним D и величины НПУ $a_{\max}$, действующего на уровне ВГР. Ось ПУ 2 обозначена цифрой 4.

На фиг. 2 и 3 представлены схемы расчета действия гравитационных ускорений (G) и центробеж-

ных ускорений (C), действующих на экипаж на уровне ВГР криволинейного участка закругления колеи рельсовой дороги. Эти схемы соответствуют традиционно применяемым формулам, оценивающим действие векторов гравитационного $G=9.81 \text{ м/с}^2$ (фиг. 2) и центробежного $C=k \cdot v^2 \text{ м/с}^2$ (фиг. 3) ускорений на участках закруглений колеи с постоянной или с переменной кривизной без учета возвышения ЦМ экипажа или вестибулярного аппарата пассажира над уровнем ВГР. На фиг. 3 обозначены позицией 5 называемый далее также как "левый" наружный и позицией 6 называемый далее также как "правый" внутренний рельсы.

На фиг. 4 схематично изображены векторы ускорений G_L и G_R , действующие по нормали к оси колесной пары экипажа 7, значения которых зависят от ускорения силы земного притяжения $g=9.81 \text{ м/с}^2$, угла α поперечного уклона колеи i и отношения значения параметра H к S , а также от вертикальных ускорений, обусловленных скоростью движения V , вертикальной кривизной оси k_v , а также кривизной k_L и k_R эпюр отвода возвышения D по левому и правому рельсам колеи (гравитационные составляющие).

На фиг. 5 схематично изображено графическое представление векторов, действующих по нормали к оси колесной пары ускорений C_L и C_R , значения которых зависят от кривизны траектории расчетной точки экипажа 7 и скорости движения V , а также от угла α поперечного уклона колеи i и отношения значения параметра H к S (центробежные составляющие).

Фиг. 6 и 7 схематично изображены суммарные векторы силы реакции F_L левого 5 (наружного) и силы реакции F_R правого 6 (внутреннего) рельсов, определяемые с учетом направления вектора НПУ $a_{\max}$, а также зависящего от этого центростремительного или центробежного направления вектора силы поперечной реакции F_C левого (наружного) или правого (внутреннего) рельсов.

На фиг. 8 представлена расчетная схема учета геометрических свойств формы колеи ПУ, а также возвышения H точки M над уровнем ВГР в координатном методе описания ее кинематики.

На фиг. 9-13 схематично представлены графики нормализованных геометрических свойств наиболее близкой к заявляемой форме ПУ функции Order (3, 7) [3], а также присущие ей амплитуды осцилляций интегративных показателей качества функционирования системы ПЭ, которые представлены графиками: кривизны оси ее колеи и траекторий движения расчетных точек на разных уровнях экипажа (фиг. 10), НПУ $a(l)$ (фиг. 11) и скорости их изменения da/dt (фиг. 12), действующих на этих же уровнях экипажа, а также силы реакции левого F_L и правого F_R рельсов и их разности (фиг. 13). Все показатели, положенные в основу этих графиков, рассчитаны по зависимостям МДКМ [6] при $V=400 \text{ км/ч}$, $R=8000 \text{ м}$, $D=150 \text{ мм}$, $S=1520 \text{ мм}$ и $L=420 \text{ м}$ на расчетном уровне $H=2200 \text{ мм}$.

На фиг. 14 схематично представлено поперечное сечение колеи ПУ и соответствующие ему half-sine закономерности эпюр превышений головок рельс над линией продольного профиля оси ПУ при их симметричном отводе на величину $\pm D/2$ (см. фиг. 15).

На фиг. 16 схематично представлено поперечное сечение колеи ПУ и соответствующая ему half-sine закономерность эпюры превышения головки наружного (левого) рельса над линией продольного верха головки внутреннего (правого) рельса при асимметричном его отводе на величину D , а также закономерность эпюры дополнительных превышений оси колеи над ее проектным положением (см. позицию 8), обусловленных данным методом отвода (см. фиг. 17).

На фиг. 18 представлена расчетная схема унифицированного метода вычисления локальных прямоугольных координат n -й точки оси колеи ПУ любой формы при известной функции угла касательной к ней $\beta(\delta)$. На чертеже позициями обозначены ось 9 прямолинейного участка колеи, ось 4 переходного участка закругления колеи и ось 10 кругового участка закругления колеи радиуса R .

На фиг. 19 приведено графическое и аналитическое представление функции цели гармонизации формы ПУ, геометрические свойства которой описаны закономерностями (формулами) (1)-(12). Пунктирными линиями показан характер закономерностей эпюр значений $d\psi/dt$ функционала (14) и их осцилляции, дисперсия амплитуд которых последовательно уменьшаются в ходе гармонизации.

На фиг. 20-24 в графическом виде представлен пример геометрических и функциональных свойств системы ПЭ, обеспечиваемых гармонизированной формой ПУ по изобретению (в одной из возможных, но не ограничивающих форм реализации) при оптимальных значениях $L=420 \text{ м}$, $Z=0.64$, $U=-0.38$ и заданных значениях параметров $V=400 \text{ км/ч}$, $R=8000 \text{ м}$, $D=150 \text{ мм}$, $S=1520 \text{ мм}$ и $H=2200 \text{ мм}$.

На фиг. 25 представлены зависимости оптимальных длин L ПУ закругления колеи $S=1520 \text{ мм}$ от НПУ $a_{\max}$, полученные в результате их гармонизации при фиксированных значениях $H=2200 \text{ мм}$ для 240 вариантов сочетания выборки значений предопределенных параметров V , R и D . Эта выборка включала 4 дискретных значения скорости, варьируемой с шагом 100 км/ч в диапазоне $100 \leq V \leq 400 \text{ км/ч}$, для каждого из которых устанавливалось 6 дискретных значений возвышения наружного рельса над внутренним, варьируемых с шагом 25 мм в диапазоне $25 \leq D \leq 150 \text{ мм}$. Для каждого из образуемых таким образом 24 вариантов сочетания разных значений пар параметров V и D вычислялось 10 значений радиусов R , обеспечивающих соответствующее число дискретных значений НПУ $a_{\max}$, варьируемых с шагом 0.1 м/с^2 в диапазоне $0.1 \leq a_{\max} \leq 1.0 \text{ м/с}^2$. При отображении точек с координатами $a_{\max}$ L масштаб оси абсцисс и диапазон отображаемых на ней оптимальных длин L для каждого из 3 значений скорости $V=300 \text{ км/ч}$, $V=200 \text{ км/ч}$ и $V=100 \text{ км/ч}$ согласовывался с абсциссами оптимальных длин L , вычисленными при расчетной

скорости $V=400$ км/ч. В результате этого положение всех 180 точек с одинаковыми ординатами $a_{\max}$ и разными абсциссами L , вычисленными при расчетных скоростях $V=300$ км/ч, $V=200$ км/ч и $V=100$ км/ч, совпадало с положением 60 точек с такими же ординатами $a_{\max}$ и абсциссами L , вычисленными при расчетной скорости $V=400$ км/ч. Это позволило представить результаты гармонизации форм ПУ, полученные по всему объему выборки, лишь 6-ю линиями одного графика гипотетически степенных зависимостей оптимальных длин L ПУ от подмножества вариантов сочетания значений параметров V , R , D , H и S , в каждом из которых радиус R согласован с параметрами V , D и S по расчетной величине НПУ закругления $a_{\max}$, варьируемой в диапазоне $0.1 \leq a_{\max} \leq 1.0$ м/с².

Аналогичным образом на фиг. 25 представлена вертикальная линия графика, традиционно ограничивающего минимальные длины L клотоидных форм ПУ по максимально допустимой скорости подъема колеса $\lambda=1/10$ км/ч. Также на фиг. 25 представлены линии графиков, которые ограничивают минимальные длины некоторых типов half-sine форм ПУ с такими же значениями параметров V , R и $D=150$ мм. Эти длины определены с учетом рекомендованных в [4] коэффициентов. При этих параметрах оптимальные длины гармонизированных форм ПУ совпадают с минимальными длинами клотоидных и half-sine форм ПУ лишь при одном из значений НПУ $a_{\max}$, варьируемом в данном случае в диапазоне $0.1 \leq a_{\max} \leq 0.3$ м/с². При других расчетных значениях НПУ $a_{\max}$ эти длины существенно разнятся. Вполне очевидно, что допускаемое в разных странах варьирование приемлемой скорости подъема колеса в диапазоне $\frac{1}{10} \leq \lambda \leq \frac{3}{10}$ [4, 8, 9, 10] не устранит принципиальные отличия в представленных на фиг. 25 зависимостях. Поэтому положения практической реализации данного изобретения предусматривают устройство гармонизированных форм ПУ исключительно только с соответствующими их параметрам оптимальными длинами L .

На фиг. 26 и 27 представлены примеры зависимостей максимальных значений $\psi_{\max}$ (фиг. 26) и сдвижек p круговых участков осей закруглений (фиг. 27) от расчетных значений НПУ $a_{\max}$ и возвышений D , соответствующих оптимальным значениям параметров L , Z и U тех же 240 гармонизированных форм ПУ по изобретению (в одной из возможных, но не ограничивающих форм реализации), учтенных при построении графиков фиг. 25. В отличие от представленных на фиг. 25 графиков зависимостей оптимальных длин L зависимости максимальных значений $\psi_{\max}$ (фиг. 26) и сдвижек p круговых участков осей закруглений (фиг. 27) в данной форме представления инвариантны к расчетной скорости V .

Геометрия заявляемого ПУ закругления колеи рельсовой дороги определяется, и заявляемый ПУ функционирует следующим образом.

Каждое закругление колеи рельсовой дороги состоит из кругового 3 и двух переходных участков (ПУ) 2, связывающих его с соответствующими прямолинейными участками 1. Ось 4 кругового участка колеи описана дугой заданной кривизны $K=1/R$. При известной ширине колеи S ее радиус R назначают в зависимости от расчетных значений: скорости движения экипажей V , возвышения D наружного рельса 5 над внутренним 6 и величины НПУ $a_{\max}$, действующего на функционально значимом уровне расчетного экипажа H . В соответствии с представленной на фиг. 8 расчетной схемой кинематической модели [6] радиус кривизны горизонтальной проекции траектории точки M , возвышенной над уровнем ВГР на величину H , на круговом участке траектории с постоянным радиусом кривизны оси колеи R отличается от него на весьма малую, в сравнении с ним, величину $\frac{H \cdot D}{S}$. Поэтому максимальное значение НПУ $a_{\max}$ на круговом участке колеи вычисляют с достаточной для практических целей точностью по формуле

$$a_{\max} \approx K \cdot v^2 - g \cdot \frac{D}{S}, \quad (17)$$

При фиксированном значении расчетной скорости V требуемый баланс постоянных значений $a_{\max} \leq a_{\text{доп}}$ на этом участке закругления обеспечивается за счет подбора необходимого сочетания значений параметров R и D , допустимых по условиям проектирования.

В отличие от этого форма заявляемого ПУ закругления колеи рельсовой дороги, предшествующего круговому участку, определяется с учетом двух геометрических и одного функционального требований:

соблюдения строго монотонного и плавного изменения поперечного уклона колеи $i(l)$ и кривизны $k(l)$ ее оси на всем протяжении участка изменения значений этих параметров от нулевых значений на прямолинейном участке колеи до максимальных значений на круговом участке закругления;

соответствия геометрических свойств формы ПУ теории изгиба балки на упругом основании;

согласования длины и закономерностей свойств изгиба рельс колеи ПУ в горизонтальной и вертикальной плоскостях проекции в целях достижения наивысшего уровня качества функционирования системы ПЭ.

Соблюдение геометрических требований обеспечивается за счет заявляемых свойств функций изменения угла дуги оси колеи, ее кривизны и ее поперечного уклона. Описываемый ими изгиб рельс обеспечивает G^3 -й порядок геометрической гладкости в вертикальной плоскости проекции и G^6 -й - в горизонтальной плоскости проекции.

Соблюдение функционального требования обеспечивается за счет вариативности заявляемых свойств нетождественных функций изменения кривизны оси колеи и ее поперечного уклона. Варьирование длины ПУ и свойств его формы влияет на показатели кинематики расчетной точки на функционально значимом уровне экипажа, возвышенном над уровнем ВГР на величину $H > 0$. Интегративные показате-

тели качества этого процесса включены в формализованную цель процедуры согласования значений управляемых и предопределенных параметров системы ПЭ, обеспечивающих наибольшую эффективность их взаимодействия. Эта цель достигается при оптимальных значениях управляемых параметров L , Z и U , вычисляемых при заданных значениях параметров V , R , D , H и S в следующей последовательности:

1. С учетом вычисленного по формуле (17) НПУ $a_{\max}$ по формулам (15) и (16) вычисляют соответствующие ему относительные доли δ_b и δ_e длины участка эпюры функционала (14), в пределах которого необходимо оценивать и в соответствии с функцией цели (13) минимизировать дисперсию амплитуд осцилляций W его значений.

2. Устанавливают начальные значения искомых параметров $L=20$ м, $Z=0$ и $U=0$.

3. К оптимальным значениям этих параметров приближают в ходе 5-ти циклов, в пределах каждого из которых, в течении 20-ти итераций методом Ньютона последовательно приближают сначала значение L при фиксированных текущих значениях Z и U , затем значение Z при фиксированных текущих значениях L и U и, наконец, значение U при фиксированных текущих значениях L и Z . При этом

новые значения каждого из параметров, устанавливаемое в конце каждого 20-го итерационного цикла его приближения, которое далее будет учитываться в процессе приближения значения последующих параметров, выбирают из перечня их корректных значений, обеспечивающих по условию (13) наименьшую дисперсию W ;

необходимые для вычисления W значения функционала (14) $d\psi/dt$ и его частные производные следует рассчитывать с шагом $\Delta\delta=(\delta_e-\delta_b)/(M-1)$ при $M \geq 1000$;

некорректными являются результаты

с отрицательной или с превышающей допустимую для данного закругления длиной L ;

со значениями параметра Z , выходящими в процессе расчета за пределы допустимых значений - $88 \leq Z \leq 33$;

со значениями параметра U , выходящими в процессе расчета за пределы его допустимых значений - $45 \leq U \leq 55$;

кривизну k_H траектории расчетной точки экипажа на уровне H , а также ее производные, необходимые для расчета текущих значений функционала (14), следует вычислять с учетом описанных в [6] детерминированных зависимостей МДКМ;

каждое из претендующих на новое приближенное значение параметра L_{n+1} , Z_{n+1} и U_{n+1} вычисляют по формулам

$$L_{n+1} = L_n - \sum_{\delta=\delta_b}^{\delta=\delta_e} \left(\frac{d\psi(\delta)}{dt} \right)^2 \Bigg/ \left(6 \cdot \sum_{\delta=\delta_b}^{\delta=\delta_e} \frac{d\psi(\delta)}{dt} \cdot \frac{\partial^2 \psi(\delta)}{\partial t \partial L_n} \right) \quad (18)$$

$$Z_{n+1} = Z_n - \sum_{\delta=\delta_b}^{\delta=\delta_e} \left(\frac{d\psi(\delta)}{dt} \right)^2 \Bigg/ \left(6 \cdot \sum_{\delta=\delta_b}^{\delta=\delta_e} \frac{d\psi(\delta)}{dt} \cdot \frac{\partial^2 \psi(\delta)}{\partial t \partial Z_n} \right) \quad (19)$$

$$U_{n+1} = U_n - \sum_{\delta=\delta_b}^{\delta=\delta_e} \left(\frac{d\psi(\delta)}{dt} \right)^2 \Bigg/ \left(6 \cdot \sum_{\delta=\delta_b}^{\delta=\delta_e} \frac{d\psi(\delta)}{dt} \cdot \frac{\partial^2 \psi(\delta)}{\partial t \partial U_n} \right) \quad (20)$$

соблюдение этих рекомендаций позволяет минимизировать функцию цели (13) при $W \leq 1.0E-03$ или с гораздо лучшим результатом.

4. Вычисленную таким образом оптимальную длину L ПУ округляют до ближайшего большего целого значения, кратного 1 м. Более грубое округление, например, кратно 5, 10 или до 20 и более метров крайне нежелательно. Особенно в меньшую сторону, т.к. приводит к существенному увеличению дисперсии амплитуд осцилляций функции $d\psi/dt$. В конечном итоге это может привести к вибрации, толчкам или раскачиванию кузова экипажа в процессе эксплуатации ПУ при проектных значениях параметров V , R , D , H и S .

5. Значения параметров Z и U могут быть округлены с погрешностью ± 0.01 .

Соответствующие этим требованиям значения параметров L , Z и U являются гармонизированными со значениями других предопределенных параметров закругления колеи и расчетного экипажа V , R , D , H и S . Они будут актуальны и могут многократно применяться при устройстве ПУ заявляемой формы в других закруглениях рельсовой колеи с аналогичным или с другим углом поворота $\pm\theta$ при соблюдении условия $|\theta| \geq L/R$ и постоянстве расчетных значений предопределенных параметров V , R , D , H и S . В случае изменения хотя бы одного из них вычисления по пп.1-5 описанной выше процедуры гармонизации значений параметров L , Z и U следует повторить.

При актуальных значениях параметров L , Z и U относительные прямоугольные координаты оси заявляемого ПУ $x[n]$ и $y[n]$ следует вычислять по формулам (1) и (2) при $N=L \cdot 10 + 1$. При соблюдении этого условия разница между длиной дуги $\Delta l = 0.1$ м и длиной стягивающей ее хорды от точки $n-1$ и до точки n будет весьма незначительной. Это обеспечит достаточную для практических целей детальность и точность расчета как абсолютных координат оси закругления в установленной на объекте системе, так и других его геометрических характеристик. При этом значения тангенсов, биссектрисы, центра круговой кривой и ее сдвиги, необходимые для устройства закругления колеи с ПУ заявляемой формы, вычис-

ляются по стандартной методике и по общеизвестным формулам, применимым к закруглению с любой другой формой ПУ при известных локальных координатах $x[N-1]$ и $y[N-1]$ точек в конце оси колеи каждого из ПУ и угле β всей дуги его оси.

При традиционной технологии поточечной разбивки оси ПУ заявляемой формы на местности с шагом, большим чем Δ_l , можно использовать координаты только тех точек, кратность номеров которых соответствует этим требованиям. При устройстве колеи ПУ заявляемой формы с применением автоматизированных систем управления рихтовочно-подбивочными машинами, а также при формировании в современных информационных технологиях их 3D моделей, целесообразно определять местоположение оси колеи ПУ с достаточно подробным дециметровым шагом. Для этого достаточно учесть координаты всего числа N , рассчитанных по формулам (1) и (2) точек.

Конструктивные и функциональные преимущества закруглений колеи с ПУ заявляемой формы подтверждены результатами гармонизации 240 вариантов сочетания значений предопределенных параметров закруглений колеи шириной $S=1520$ мм, сформированных при 4-х дискретных значениях скорости V , варьируемой с шагом 100 км/ч в диапазоне $100 \leq V \leq 400$ км/ч, для каждого из которых устанавливались 6 дискретных значений возвышения наружного рельса над внутренним, варьируемых с шагом 25 мм в диапазоне $25 < D < 150$ мм. Для каждого из 24 вариантов сочетания разных значений пар параметров V и D вычислялось 10 значений радиусов R , обеспечивающих соответствующее число дискретных значений НПУ $a_{\max}$, варьируемых с шагом 0.1 м/с^2 в диапазоне $0.1 \leq a_{\max} \leq 1.0 \text{ м/с}^2$.

Оптимальные значения L , Z и U всех 240 вариантов сочетания значений V , R и D с фиксированным значением возвышения функционально значимого уровня расчетного экипажа $H=2200$ мм были вычислены при $1.0\text{E-}07 \leq W \leq 4.0\text{E-}04$. Такая степень минимизации функции цели (13) обеспечила высокий уровень качества функционирования системы ПЭ, подтверждаемый G^1 -гладкими квазилинейными эпюрами НПУ $a(l)$ (см. фиг. 22) и G^0 -гладкими трапецевидными эпюрами скорости его изменения $\psi=da/dt$ (см. фиг. 23). При этом отклонения максимальных значений этой скорости $\psi_{\max}$ от абсолютного, но практически недостижимого минимума $\psi_{\min}$ были существенно меньше, чем у известных форм ПУ предшествующего уровня техники с аналогичными значениями параметров V , R , D и L . Наряду со значениями параметра $\psi_{\max}$ результаты гармонизации форм ПУ дополнялись значениями так называемой сдвиги круговой кривой p , по значению которой в комплексе со значениями R и L можно судить о конструктивных преимуществах заявляемой формы ПУ, имеющих важное для трассирования рельсовых дорог значение.

Часть результатов, полученных при гармонизации форм ПУ с расчетным возвышением $D=150$ мм для расчетных скоростей $V=400$ км/ч и $V=100$ км/ч, приведена в таблице. Они указывают на наличие устойчивой их зависимости от расчетных значений НПУ $a_{\max}$. Более наглядно характер и особенности этой зависимости иллюстрируют графики, представленные на фиг. 25-27.

Пример оптимальных значений параметров L , Z и U заявляемых форм ПУ с $D=150$ мм, гармонизированных для расчетных значений НПУ, варьируемых в диапазоне $0.1 \leq a_{\max} \leq 1.0 \text{ м/с}^2$ при $V=400$ км/ч (см. числитель) и $V=100$ км/ч (см. знаменатель) для $H=2200$ мм и $S=1520$ мм

$a_{\max}, \text{ м/с}^2$	$R, \text{ м}$	$L, \text{ м}$	Z	U	$\psi_{\max}, \text{ м/с}^3$	$p, \text{ м}$
0.1	12110 / 760	930 / 233	-3.52 / -4.52	6.52 / 8.52	0.014 / 0.014	0.932 / 0.960
0.2	11030 / 690	686 / 171	-0.04 / -0.31	-0.11 / -0.11	0.035 / 0.035	0.561 / 0.558
0.3	10120 / 630	580 / 145	0.43 / 0.25	-0.62 / -0.62	0.063 / 0.063	0.437 / 0.436
0.4	9360 / 585	513 / 128	0.26 / -0.04	-0.15 / -0.32	0.095 / 0.095	0.370 / 0.368
0.5	8700 / 545	464 / 116	0.40 / 0.16	-0.45 / -0.33	0.132 / 0.131	0.325 / 0.325
0.6	8125 / 510	426 / 106	0.01 / -0.26	-0.42 / -0.18	0.172 / 0.170	0.294 / 0.295
0.7	7620 / 480	397 / 99	-0.03 / -0.30	-0.18 / -0.22	0.216 / 0.217	0.272 / 0.271
0.8	7180 / 450	373 / 93	0.18 / -0.53	-0.40 / -0.38	0.263 / 0.26	0.255 / 0.253
0.9	6785 / 425	353 / 88	0.31 / -0.20	-0.59 / -0.71	0.313 / 0.314	0.241 / 0.240
1.0	6430 / 400	336 / 84	0.34 / 0.28	-0.43 / -0.39	0.366 / 0.366	0.231 / 0.230

Из анализа графиков, представленных на фиг. 25, следует, что степенные зависимости оптимальных длин L_{opt} гармонизированных ПУ заявляемой формы существенно отличаются от вертикальной линии графика зависимости минимальных длин $L_{\min}$ клотоидных форм ПУ, традиционно нормируемых по так называемой допустимой скорости подъема наружного колеса по возвышению $\lambda=V \cdot D/L$. В данном примере она ограничивает минимальные длины $L_{\min}$ клотоидных форм ПУ закруглений с расчетным возвышением $D=1500$ мм при рекомендованной в [8, 9, 10] допустимой скорости подъема наружного колеса $\lambda=1/10$ км/ч (≈ 28 мм/с). В случае применения рекомендованных в [4] half-sine форм ПУ их минимальные длины будут еще больше отличаться от оптимальных длин гармонизованных ПУ заявляемой формы. Исходя из явной тенденции к увеличению коэффициентов пропорциональности, коррелирующих с порядком геометрической гладкости соответствующих им типов half-sine форм ПУ, минимальные длины более совершенных и более гладких half-sine форм ПУ могут быть еще больше. Это указывает на явные

проблемы эмпирических методов нормирования длин ПУ по любому из допустимых значений параметра λ или отношения D/L , не опосредованная причинно-следственная связь которых с интегративными показателями качества движения не обоснована.

Из анализа графиков, представленных на фиг. 26, следует, что гармонизированным ПУ заявляемой формы присущи полиномиальные зависимости максимальной скорости изменения $\psi_{\max}$ от расчетных значений НПУ $a_{\max}$, которые в отличие от оптимальных значений длин инвариантны по отношению к расчетной скорости движения V . При этом соответствующий показателю $\psi_{\max}$ проектный уровень комфорта движения на гармонизированном ПУ заявляемой формы будет тем выше, чем больше будет расчетное возвышение D . Как следует из графика функции $\psi_{\max}$ при $D=150$ мм, ее значения во всем диапазоне варьирования НПУ $0.1 \leq a_{\max} \leq 1.0$ м/с² не превышают даже нижней границы диапазона традиционно рекомендуемых норм $0.4 \leq \psi_{\max} \leq 0.6$ м/с³.

Из анализа графиков, представленных на фиг. 27, следует, что сдвигам p круговых кривых закруглений с гармонизированными ПУ заявляемой формы также присущи инвариантные по отношению к расчетной скорости движения V полиномиальные зависимости от расчетных значений НПУ $a_{\max}$. При этом значения сдвижек p круговых кривых весьма распространенных и проблемных закруглений с клотоидными формами ПУ. Как показывают расчеты, кратная разница этих сдвижек способствует переустройству закруглений с клотоидными формами ПУ на закругления с гармонизированными ПУ заявляемой формы в целях повышения скорости и удобства движения с наименьшими параметрами рихтовки существующего пути.

Учет приведенных закономерностей может способствовать принятию оптимальных решений при устройстве новых или реконструкции существующих закруглений рельсовых дорог. Из-за большого числа возможных вариантов сочетания predetermined значений параметров V , R , D , H и S , варьирующих в достаточно широком диапазоне, традиционное представление предварительно рассчитанных оптимальных значений L , Z и U гармонизированных форм ПУ в виде таблиц или графиков не представляется целесообразным. Для современных автоматизированных технологий проектирования, строительства и эксплуатации рельсовых дорог более приемлема программная реализация алгоритмов гармонизации форм ПУ и расчета необходимых для их устройства координат в соответствии с положениями данного изобретения.

В отличие от решений предшествующего уровня техники, объективные законы физики и математически и обоснованные методы гармонизации, положенные в основу данного изобретения, обеспечивают поиск оптимальных значений всех необходимых параметров конструкции переходных участков закруглений, геометрические свойства формы которых описаны закономерностями (1)-(12). Они прямо и непосредственно, а не косвенно и опосредовано, обеспечивают интегративное качество функционирования системы Путь+Экипаж. При этом уровень этого качества зависит от согласованности и соизмеримости таких ее параметров, как возвышение расчетной точки экипажа H , скорость его движения V , радиус закругления R , возвышение наружного рельса D и метода его отвода. Поэтому положения и отличительные особенности данного изобретения следует учитывать также еще и на этапе принятия решений об основных значениях параметров закруглений проектируемых трасс рельсовых магистралей.

Источники информации.

1. Bjorn Kufver, VTI rapport 420A, "Mathematical description of railway alignments and some preliminary comparative studies", Swedish National Road and Transport Research Institute, 1997. Digitala Vetenskapliga Arkivet (цифровой научный архив). [Электронный ресурс] - 17 июля 2020. - Режим доступа: <http://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A675179&dsid=4876>.
2. Патент EP № 1523597B1, опубл. 16.07.2008 г.
3. Klauder, Louis, T., Jr. Railroad curve transition spiral design method based on control of vehicle banking motion. Available from: <https://patentscope.wipo.int/search/ru/detail.jsf?docId=WO2001098938&recNum=1&maxRec=&office=&prevFilter=&sortOption=&queryString=&tab=PCTDescription>
4. EN 13803-1:2010: Railway applications - Track-Track alignment design parameters - Track gauges 1435 mm and wider - Part 1: Plain line [Required by Directive 2008/57/EC]
5. M. Ueno et al.: Motion Sickness Caused by High Curve Speed Railway Vehicles. Jpn J Ind Health 1986; 28: 266-274.
6. Velichko, G. 2020. Quality analysis and evaluation technique of railway track + vehicle system performance at railway transition sections with various shape curves, In Transport Means 2020: Proceedings of the 24th International Scientific Conference, Part II: 573-578. Available from: <https://transportmeans.ktu.edu/wp-content/uploads/sites/307/2018/02/Transport-means-A4-II-dalis.pdf>
7. Velichko, G. 2020. Shape Harmonization of the Railway Track Transition Section & the Kinematics of Vehicle Body Design Point, In Transport Means 2020: Proceedings of the 24th International Scientific Conference, Part II: 910-915. Available from: <https://transportmeans.ktu.edu/wp-content/uploads/sites/307/2018/02/Transport-means-A4-II-dalis.pdf>
8. Шахунянц Г. М. Железнодорожный путь / Г. М. Шахунянц. - Москва : Транспорт, 1987. - 479 с.
9. Теоретичні основи впровадження високошвидкісного руху поїздів в Україні: монографія / М.Б.Курган, Д.М. Курган; Дніпропетр. нац. ун-т заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. - Дніпро, 2016. - 283 с.
10. С.В. Шкурников и др. Общие требования к проектированию ВСМ Москва-Казань «Транспорт Российской Федерации» № 2(57) 2015 26-29 с.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Переходный участок закругления колеи рельсовой дороги, сопрягающий на длине L смежные с ним прямолинейный участок и круговую часть закругления с постоянным радиусом R , содержащий основание и формирующую колею рельсошпальную решетку, уложенную на нем в соответствии с координатами проекции точек оси переходного участка на горизонтальную плоскость с переменной по длине L величиной поперечного уклона i нормальной к оси линии, касательной к поверхности верха головок рельс, при этом форма оси колеи переходного участка определена местоположением N равноудаленных друг от друга точек с координатами $x[n]$ и $y[n]$, а поперечный уклон $i[n]$ колеи в этих точках изменяется вдоль оси переходного участка в диапазоне $0 \leq i[n] \leq D/S$, где D - расчетное возвышение наружного рельса колеи над внутренним в пределах круговой части оси закругления рельсовой дороги, а S - расстояние между вертикальными осями поперечного сечения рельс колеи, по мере равномерного наращивания на постоянную величину $\Delta_l = L/(N-1)$ расстояния $l[n]$ до каждой ее n -й точки от $l[0] = 0.0$ м в начале оси переходного участка и до $l[N-1] = L$ в его конце, отличается тем, что относительные прямоугольные координаты точек проекции оси колеи $x[n]$ и $y[n]$ определены по формулам

$$x[0] = 0.0; \quad x[n] = x[n-1] + \Delta_l \cdot \cos(\beta_b(\delta) + \Delta_\beta(\delta)) \quad (1)$$

$$y[0] = 0.0; \quad y[n] = y[n-1] + \Delta_l \cdot \sin(\beta_b(\delta) + \Delta_\beta(\delta)) \quad (2)$$

где

n - порядковый номер точки оси переходного участка, изменяющийся в диапазоне $1 \leq n \leq (N-1)$,

$x[n]$ - координата, характеризующая расстояние от начала переходного участка до места проекции n -й точки оси на линию, касательную к ней в точках $x[0]$ и $y[0]$,

$y[n]$ - координата, характеризующая смещение в сторону центра кривизны оси ее n -й точки, измеряемое по нормали от линии, касательной к ней в точках $x[0]$ и $y[0]$,

Δ_l - постоянная величина приращения текущей длины l оси колеи переходного участка, измеряемой по ее дуге от ее начала до каждой n -й точки,

δ - относительная доля текущей длины $l + \Delta_l/2$ оси колеи переходного участка, измеряемой от ее начала до середины отрезка оси, заключенного между ее смежными точками $n-1$ и n , вычисляемая по формуле

$$\delta = \frac{2n-1}{2(N-1)} \quad (3)$$

$\beta_b(\delta)$ - значение функции основного угла касательной к оси колеи переходного участка, вычисляемого в зависимости от относительной доли δ текущей длины $l + \Delta_l/2$ до точки касания по формуле

$$\beta_b(\delta) = \frac{L}{R} \delta^6 \left(\frac{315}{6} - \delta \left(\frac{2043}{7} - \delta \left(\frac{6720}{8} - \delta \left(\frac{14085}{9} - \delta \left(\frac{19795}{10} - \delta \left(\frac{18579}{11} - \delta \left(\frac{11178}{12} - \delta \left(\frac{3900}{13} - \frac{600}{14} \delta \right) \right) \right) \right) \right) \right) \right) \right) \right), \quad (4)$$

$\Delta_\beta(\delta)$ - значение функции дополнения к основному углу касательной к оси переходного участка, вычисляемой в зависимости от относительной доли δ текущей длины $l + \Delta_l/2$ до точки касания по формуле

$$\Delta_\beta(\delta) = U \frac{L}{R} \delta^6 \left(\frac{7}{6} - \delta \left(\frac{74}{7} - \delta \left(\frac{340}{8} - \delta \left(\frac{885}{9} - \delta \left(\frac{1425}{10} - \delta \left(\frac{1452}{11} - \delta \left(\frac{914}{12} - \delta \left(\frac{325}{13} - \frac{50}{14} \delta \right) \right) \right) \right) \right) \right) \right) \right), \quad (5)$$

где

U - параметр, определяющий величину дополнений к основным значениям угла касательной к оси колеи переходного участка в каждой ее точке с относительной долей δ текущей длины $l + \Delta_l/2$,

а поперечный уклон $i[n]$ колеи переходного участка в каждой n -й точке ее оси, изменяющейся в интервале $0 \leq n \leq (N-1)$, определен по формуле

$$i[n] = i_b(\chi) + \Delta_i(\chi) \quad (6)$$

где

χ - относительная доля текущей длины l оси колеи до точки n , вычисляемая как

$$\chi = \frac{n}{N-1} \quad (7)$$

$i_b(\chi)$ - значение функции основного поперечного уклона колеи переходного участка в точке n , вычисляемое в зависимости от относительной доли χ по формуле

$$i_b(\chi) = \frac{D}{S} \chi^4 \left(37 - \chi \left(102 - \chi \left(140 - \chi \left(172 - \chi \left(198 - \chi \left(154 - \chi \left(66 - 12\chi \right) \right) \right) \right) \right) \right) \right) \quad (8)$$

$\Delta_i(\chi)$ - значение функции дополнения к основному поперечному уклону колеи в точке n , вычисляемое в зависимости от относительной доли χ по формуле

$$\Delta_i(\chi) = -Z \frac{D}{S} \chi^4 \left(1 - \chi \left(9 - \chi \left(35 - \chi \left(76 - \chi \left(99 - \chi \left(77 - \chi \left(33 - 6\chi \right) \right) \right) \right) \right) \right) \right) \quad (9)$$

где

Z - параметр, определяющий величину дополнений к основным значениям поперечного уклона колеи в каждой точке n с ее относительной долей χ .

2. Переходной участок по п.1, отличающийся тем, что при заданной величине параметра U , варьи-

руемой в диапазоне от -45 до +55, значение суммы функций основного угла касательной к оси колеи $\beta_b\left(\frac{l}{L}\right)$ и дополнений к нему $\Delta_\beta\left(\frac{l}{L}\right)$ на всем протяжении длины L переходного участка строго монотонно и непрерывно изменяется от 0 до $L/2R$, значение ее первой производной по длине l , определяющей зако-

номерность кривизны оси переходного участка $k\left(\frac{l}{L}\right) = d\left(\beta_b\left(\frac{l}{L}\right) + \Delta_\beta\left(\frac{l}{L}\right)\right)/dl$, также строго монотонно и непрерывно изменяется от 0 до $1/R$, а для суммы всех последующих 2-х, 3-х, 4-х и 5-х производных этих функций по этой же длине l обеспечивается непрерывность изменения их значений, а также равенство их нулю на обоих концах интервала $0 \leq l \leq L$, при этом функция кривизны оси колеи $k(\chi)$, где $\chi = l/L$, в каждой текущей координате длины l ПУ определена как

$$k(\chi) = k_b(\chi) + \Delta_k(\chi) \quad (10)$$

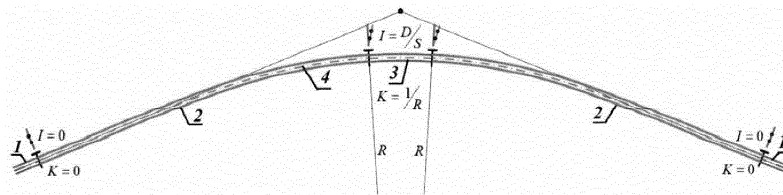
где

$$k_b(\chi) = \frac{L}{R} \chi^5 \left(315 - \chi \left(2043 - \chi \left(6720 - \chi \left(14085 - \chi \left(19795 - \chi \left(18579 - \chi \left(11178 - \chi (3900 - 600\chi) \right) \right) \right) \right) \right) \right) \right) \right), \quad (11)$$

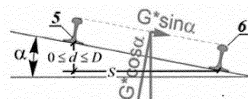
$$\Delta_k(\chi) = U \frac{L}{R} \chi^5 \left(7 - \chi \left(74 - \chi \left(340 - \chi \left(885 - \chi \left(1425 - \chi \left(1452 - \chi (914 - \chi (325 - 50\chi)) \right) \right) \right) \right) \right) \right), \quad (12)$$

U - параметр, определяющий максимальную величину дополнения к основному значению кривизны оси колеи переходного участка.

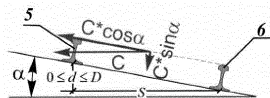
3. Переходной участок по п.1, отличающийся тем, что при заданной величине параметра Z , варьируемой в диапазоне от -88 до +33, значение суммы функций основного поперечного уклона колеи $i_b\left(\frac{l}{L}\right)$ и дополнений к нему $\Delta_i\left(\frac{l}{L}\right)$ на всем протяжении длины L переходного участка строго монотонно и непрерывно изменяются от 0 до D/S , а значения ее 1-х, 2-х и 3-х производных по длине l непрерывно изменяются при соблюдении равенства их нулю на обоих концах интервала $0 \leq l \leq L$.



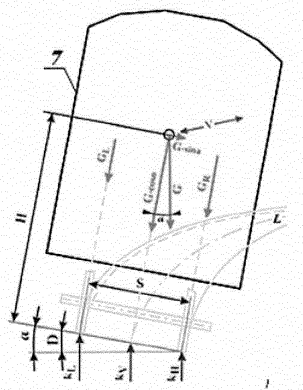
Фиг. 1



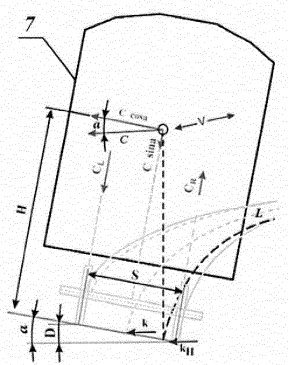
Фиг. 2



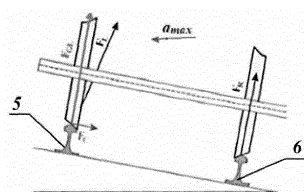
Фиг. 3



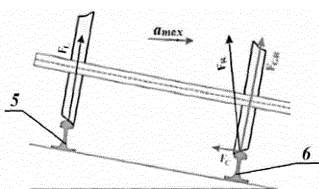
Фиг. 4



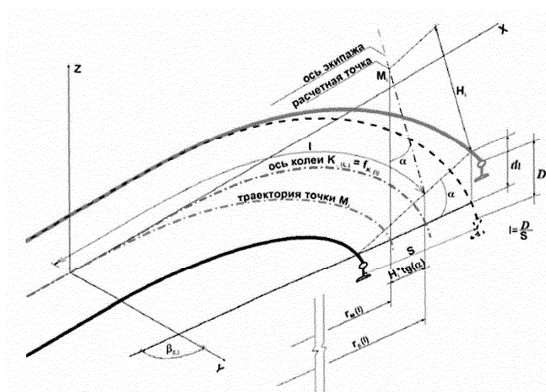
Фиг. 5



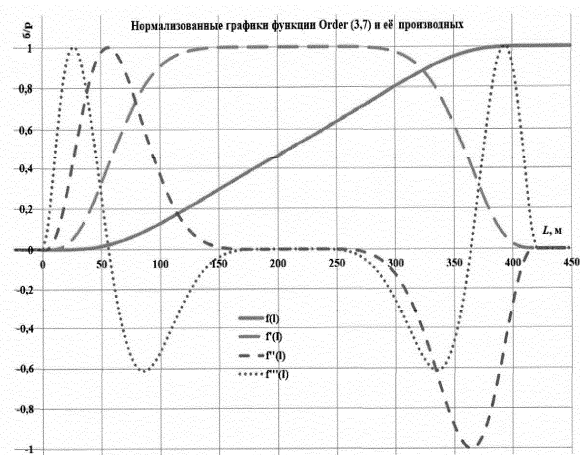
Фиг. 6



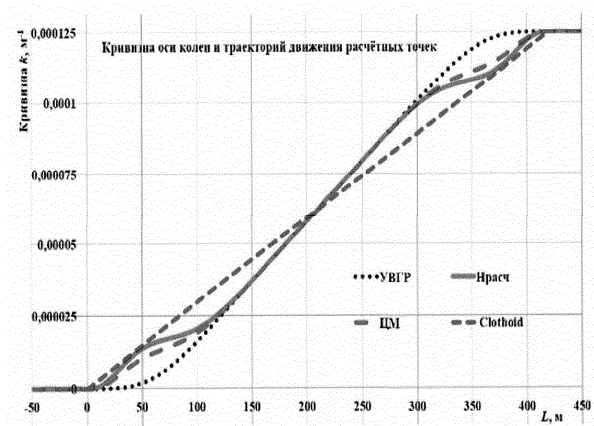
Фиг. 7



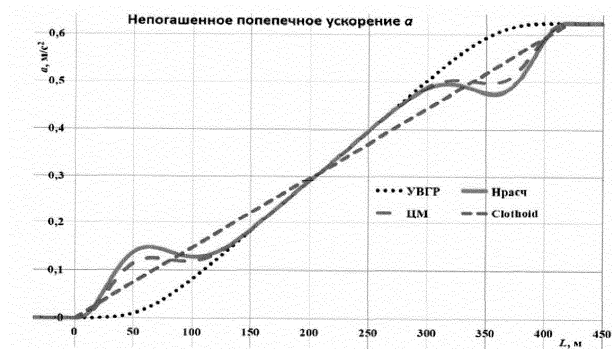
Фиг. 8



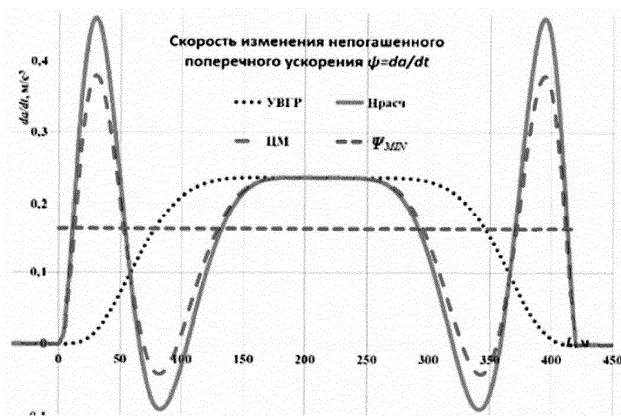
Фиг. 9



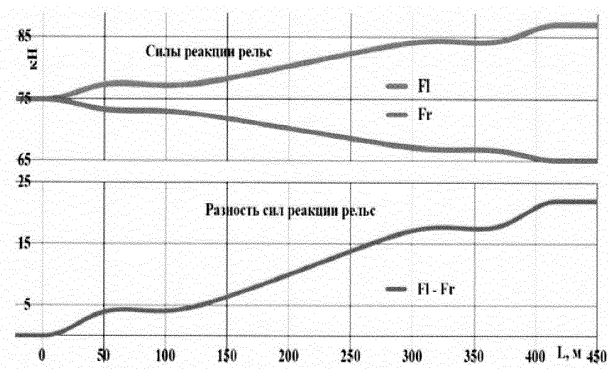
Фиг. 10



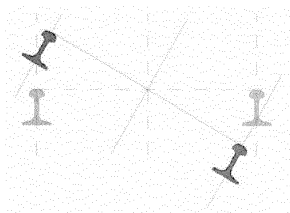
Фиг. 11



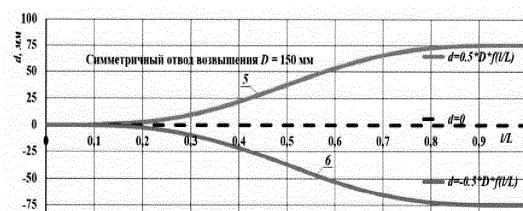
Фиг. 12



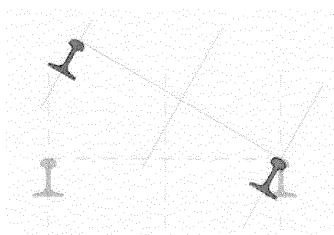
Фиг. 13



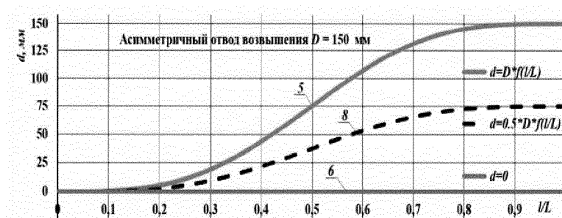
Фиг. 14



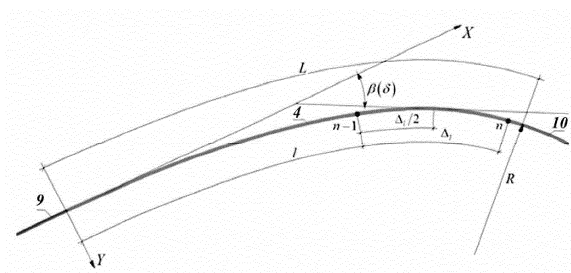
Фиг. 15



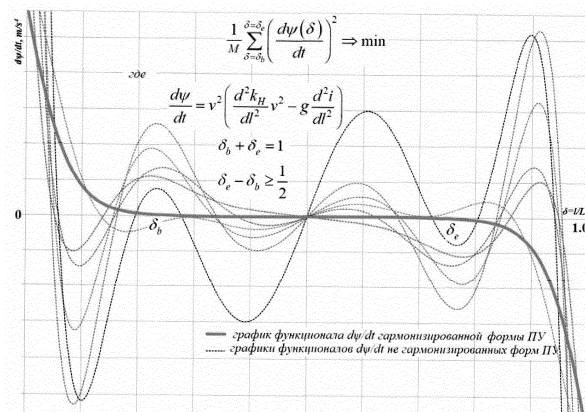
Фиг. 16



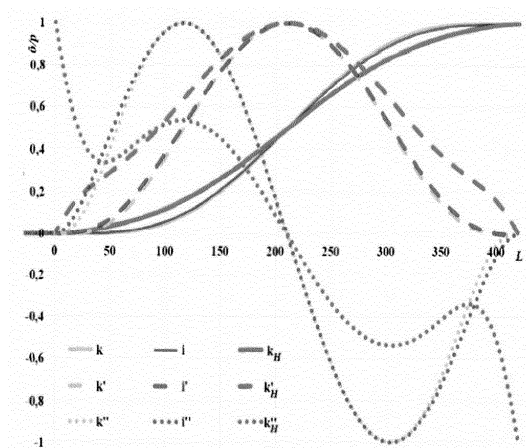
Фиг. 17



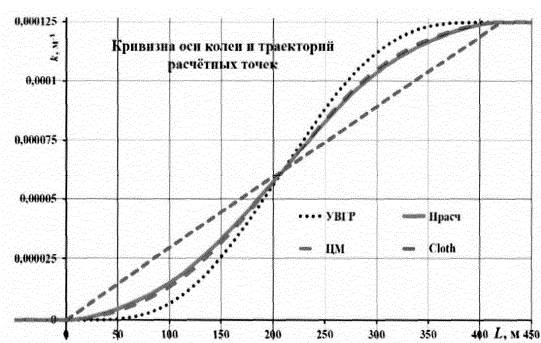
Фиг. 18



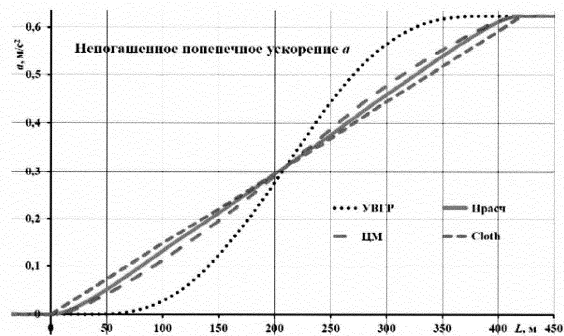
Фиг. 19



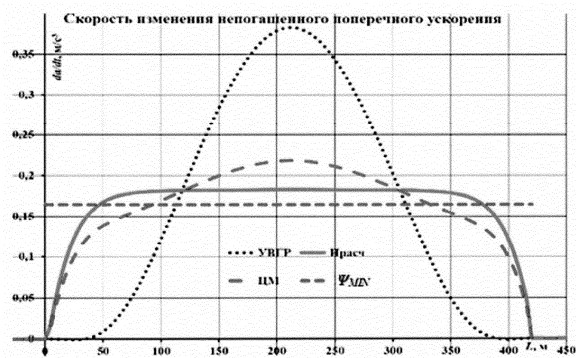
Фиг. 20



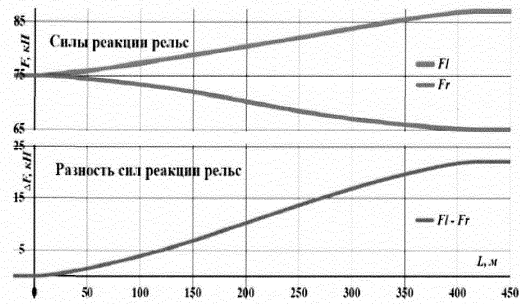
Фиг. 21



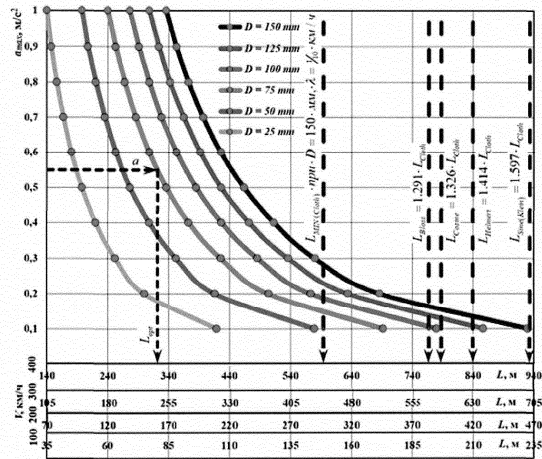
Фиг. 22



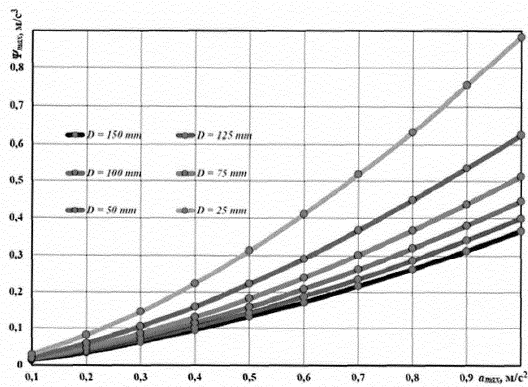
Фиг. 23



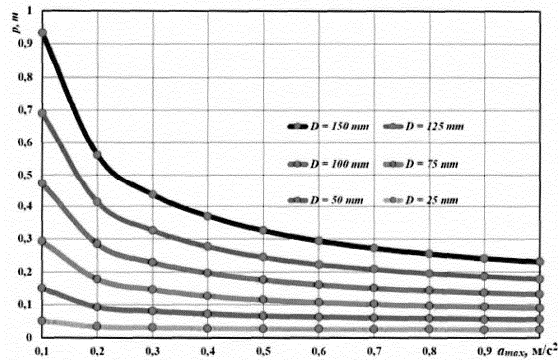
Фиг. 24



Фиг. 25



Фиг. 26



Фиг. 27

