

ОРГАНИЗАЦИЯ СОТРУДНИЧЕСТВА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ (ОСЖД)

I издание

Разработано экспертами Комиссии ОСЖД по инфраструктуре и подвижному составу 26 – 28 марта 2012 г.,
Комитет ОСЖД, г. Варшава

Согласовано совещанием Комиссии ОСЖД по инфраструктуре и подвижному составу 9 – 12 октября 2012 г.,
Комитет ОСЖД, г. Варшава

Утверждено на XXVIII заседании Конференции Генеральных директоров (ответственных представителей) железных дорог 22 - 26 апреля 2013 г., Украина, г. Одесса

Дата вступления в силу: 26 апреля 2013 г.

Примечание: 1. Памятка обязательна для ОАО «РЖД» и УЗ
2. Теряет силу I издание Памятки Р 755/4 от 23.10.1998 г.

O+P
755/4

ПАРАМЕТРЫ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЕ ПЛАВНОСТЬ ПРОЕЗДА ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ПО СТРЕЛОЧНЫМ ПЕРЕВОДАМ

1. НАЗНАЧЕНИЕ ПАМЯТКИ

Унификация требований к стрелочным переводам и другим видам стрелочной продукции, используемым странами, участницами ОСЖД, призвана обеспечить наилучшие условия обращения подвижного состава по пути и должна способствовать интеграционным процессам в рамках организации, а также реализации ее ближайших и перспективных задач.

Настоящая памятка является частью общей системы памяток по проектированию стрелочных переводов. Она посвящена формированию подходов к нормированию параметров, обеспечивающих заданный уровень воздействия на пассажиров и грузы при проезде подвижного состава по стрелочным переводам. В памятке рассматриваются вопросы динамики взаимодействия подвижного состава и стрелочных переводов в горизонтальной плоскости.

2. ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К ПЛАВНОСТИ ДВИЖЕНИЯ ПО СТРЕЛОЧНЫМ ПЕРЕВОДАМ

Целью проектирования стрелочных переводов (или других видов стрелочной продукции) является разработка конструкций, обеспечивающих выполнение требований безопасности, комфортабельности и заданных показателей эксплуатационной надежности.

Требования к плавности проезда подвижного состава по стрелочным переводам относятся к группе требований комфортабельности и безопасности движения. Их выполнение обеспечивается соответствием динамико-кинематических характеристик движения заданным, или нормируемым величинам.

При проезде железнодорожными экипажами стрелочного перевода не должно возникать резких сдвижек колесных пар, толчков и ударов, нарушающих траектории движения. Силовые факторы, связанные с особенностью движения по стрелочному переводу не должны превышать величин, обеспечивающих комфортное состояние пассажиров и допустимое воздействие на грузы.

В связи с тем, что направление движения по стрелочному переводу может быть различным, следует различать движение по прямому направлению и движение по стрелочной кривой. Динамико-кинематические требования при каждом из этих видов движения различны.

3 ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПЛАВНОСТИ ПРОЕЗДА ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ПО ПРЯМОМУ НАПРАВЛЕНИЮ СТРЕЛОЧНЫХ ПЕРЕВОДОВ

При движении по прямому направлению стрелочных переводов, изменения в горизонтальных траекториях движения колесных пар подвижного состава возникают в зоне стрелки, из-за уширения колеи, необходимого для

обеспечения укрытия острия остряков и в зоне крестовины с неподвижными элементами, из-за наличия контррельса.

3.1. Обеспечение плавности проезда подвижного состава по стрелке

Для минимизации влияния уширения колеи в острие остряков на стрелке на плавность проезда по стрелочному переводу необходимо нормировать величину уширения колеи в острие остряков - ΔS и интенсивность отвода уширения колеи - i_1 и i_2 . (рис. 1).

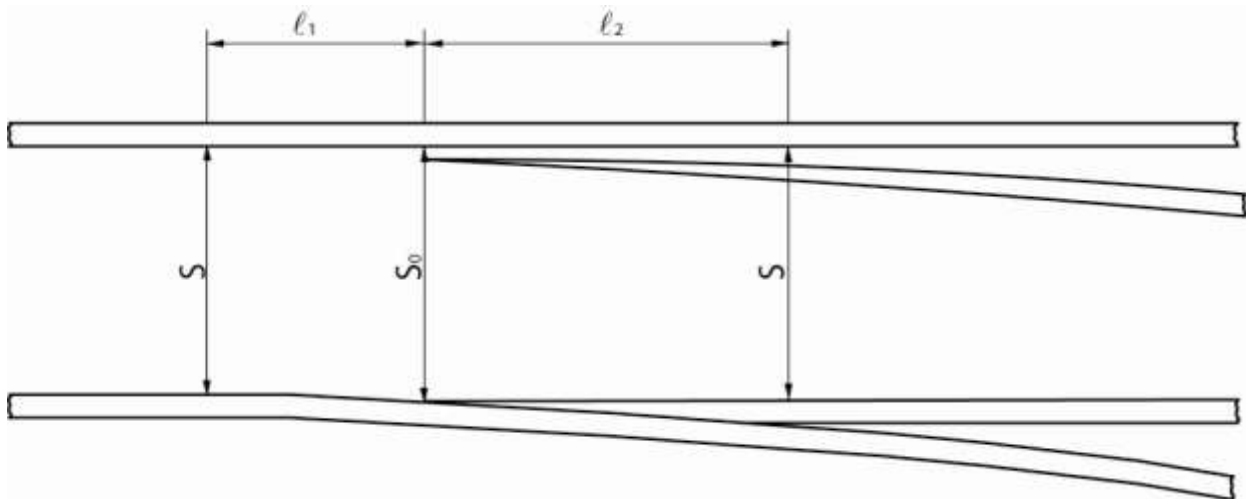


Рисунок 1

$$\Delta S = S_0 - S ,$$

$$i_1 = \Delta S / l_1 , \quad i_2 = \Delta S / l_2 , \quad (3.1)$$

где: S_0 - ширина колеи в острие остряков;
 S - ширина колеи на перегонных путях;
 l_1 - длина участка отвода уширения колеи в сторону переднего стыка рамных рельсов;
 l_2 - длина участка отвода уширения колеи в сторону крестовины.

Интенсивность отвода уширения колеи - i_1 и i_2 обычно нормируется через длины участков l_1 и l_2 на которых производятся отводы уширения колеи.

3.2. Обеспечение плавности проезда подвижного состава по соединительным путям

Обеспечение плавности проезда подвижного состава по соединительной части стрелочных переводов при движении по прямому пути не требует введения каких либо ограничений.

3.3. Обеспечение плавности проезда подвижного состава по крестовинному узлу стрелочных переводов, имеющих крестовину с неподвижными сердечником и усовиками

С целью обеспечения безопасности движения подвижного состава по крестовинным узлам с такими крестовинами в их конструкции используются контррельсы, направляющие колесные пары подвижного состава при проходе мертвого пространства на крестовине. Исследования показали, что, например, на стрелочных переводах колеи 1520 мм до 40 % колесных пар при движении по крестовинному узлу взаимодействуют с контррельсом. При этом возникают поперечные сдвиги колесных пар, нарушающие плавность проезда подвижного состава по стрелочному переводу.

Безопасность и комфортабельность движения через зону расположения контррельса должны обеспечиваться за счет ограничения потери кинетической энергии при набегании колес на контррельс и скорости поперечного смещения колесных пар (рис. 2).

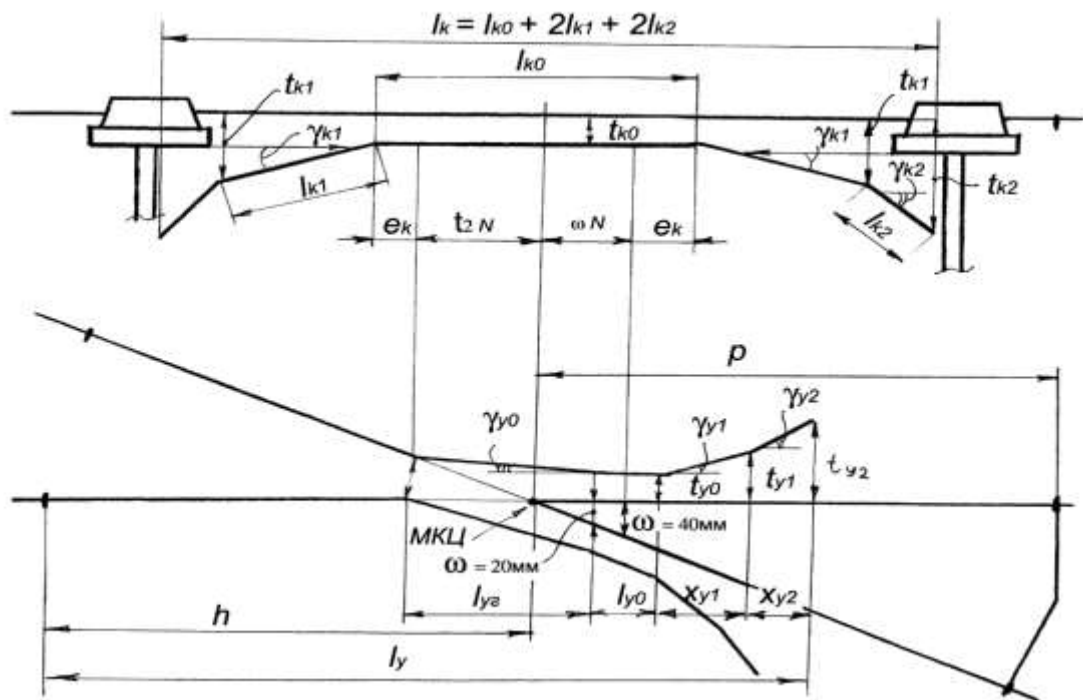


Рисунок 2

В практике проектирования стрелочных переводов для этих целей используется параметр, связанный с потерей кинетической энергии - W_k , измеряемый в [м/с], либо в [км²/ч²]. Величина предельного значения W_k определяется на основании опыта эксплуатации и динамико-прочностных испытаний.

Скорость поперечного смещения колесных пар зависит от скорости движения по стрелочному переводу. На контррельсе скорость смещения

колесных пар лимитируется углом отвода отогнутой части контррельса - γ_k , который определяется из формулы:

$$\sin \gamma_k = W_k / V, \quad (3.2)$$

где: V - скорость проезда подвижного состава по стрелочному переводу.

Аналогичным образом обеспечивается плавность движения по самой крестовине. Нормируются углы элементов крестовины. Нормируются углы отвода усювиков между горлом и зоной перекатывания колес с усювика на сердечник - γ_l

$$\sin \gamma_l = W_l / V. \quad (3.3)$$

Нормируются углы отвода усювиков со стороны хвостовой части крестовины

$$\sin \gamma_y = W_2 / V. \quad (3.4)$$

При этом величины предельного значения W_l и W_2 определяются также, как и для контррельса на основании опыта эксплуатации и динамико-прочностных испытаний.

Углы отводов улавливающих частей усювиков и контррельсов определяются по такой же методике.

3.4. Обеспечение плавности проезда подвижного состава по крестовинному узлу стрелочных переводов, имеющих крестовину с непрерывной поверхностью катания

Условия проезда подвижного состава по крестовинам с непрерывной поверхностью катания, с точки зрения плавности хода близки к условиям проезда зоны стрелки, поэтому для данного случая могут быть использованы требования, изложенные в разделе 3.1.

В связи с тем, что углы набегания колес на сердечник крестовины малы, в практике проектирования стрелочных переводов марок до 1/34 уширение колеи на крестовине может не предусматриваться.

4. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПЛАВНОСТИ ПРОЕЗДА ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ПО ОТВЕТВЛЕННОМУ НАПРАВЛЕНИЮ СТРЕЛОЧНЫХ ПЕРЕВОДОВ И ПО КРИВОЛИНЕЙНЫМ СТРЕЛОЧНЫМ ПЕРЕВОДАМ

Условия движения по криволинейной части стрелочных переводов существенным образом отличается от условий движения по перегонным кривым.

На стрелочных переводах, в отличие от кривых на перегонах, отсутствуют возвышение наружного рельса и переходные кривые. Для укрытия остряка используется подстрожка в зоне его остря, нарушающая плавность сопряжения стрелочной кривой с примыкающей к ней прямой частью. На стрелочных переводах, в конструкции которых использована стрелка с остряками секущего типа, отсутствует плавное сопряжение прямого участка с криволинейным. Сопряжение стрелочной кривой с примыкающей прямой частью осуществляется под углом (начальный стрелочный угол).

В то же время экипажи по криволинейной части стрелочного перевода проходят в течение нескольких секунд, поэтому в силу инерционных свойств время действия сил, оказывающих воздействие на пассажиров или грузы, относительно мало. В этих условиях результаты воздействия в значительной степени определяются скоростью изменения действующих сил, которая характеризуется величинами производных от перемещения второго и более высокого порядка, чем второй, то есть величинами ускорений и скоростью их изменения.

4.1. Проектирование стрелочных кривых при малых скоростях движения

При скоростях движения до 60 км/ч факторами, определяющими плавность движения по стрелочному переводу, являются величины горизонтальных поперечных ускорений. Необходимые параметры плавности движения по стрелочному переводу обеспечиваются нормированием величин внезапно появляющегося (при набегании колеса на остряк) ускорения - j_0 и постоянно действующего при движении по стрелочной кривой ускорения - γ .

Исходя из этих соображений и конструкционной скорости движения по стрелочному переводу - V определяются параметры кривизны стрелочной кривой (рис. 3).

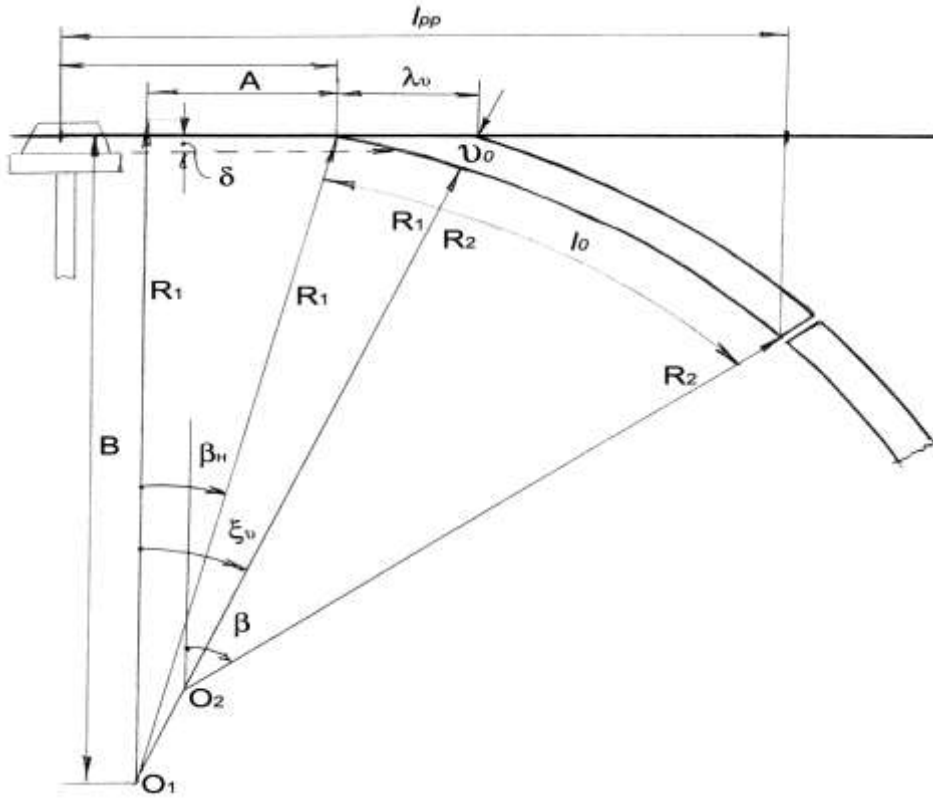


Рисунок 3

$$R_1 = V^2/j_0, \quad R_2 = V^2/\gamma, \quad (4.1)$$

где: R_1 - радиус стрелочной кривой в зоне возможного набегания колес на остряк;

R_2 - радиус стрелочной кривой вне зоны возможного набегания колес на остряк.

Начальный стрелочный угол для стрелок с остряками секущего типа определяется с учетом нормируемой величины фактора потери кинетической энергии - W_0 и возможного наибольшего зазора между гребнем колеса и рамным рельсом - δ ,

$$\sin \beta_n \leq \frac{1}{V} \sqrt{W_0^2 - 2 \delta j_0} \quad (4.2)$$

Для стрелок с остряками касательного типа $\beta_n = 0$.

При скоростях движения по стрелочным кривым свыше 100 км/ч для обеспечения плавности проезда экипажей по стрелочным переводам используются стрелочные кривые сложной формы, как правило, содержащие участки переменной кривизны. При их проектировании исходят из подробного анализа условий движения экипажа по криволинейному участку.

4.2. Проектирование стрелочных кривых при высоких скоростях движения

4.2.1. Кинематические характеристики движения по кривой

Исходя из общих положений механики радиус-вектор, характеризующий положение точки в каждый момент времени (рис. 4), равен

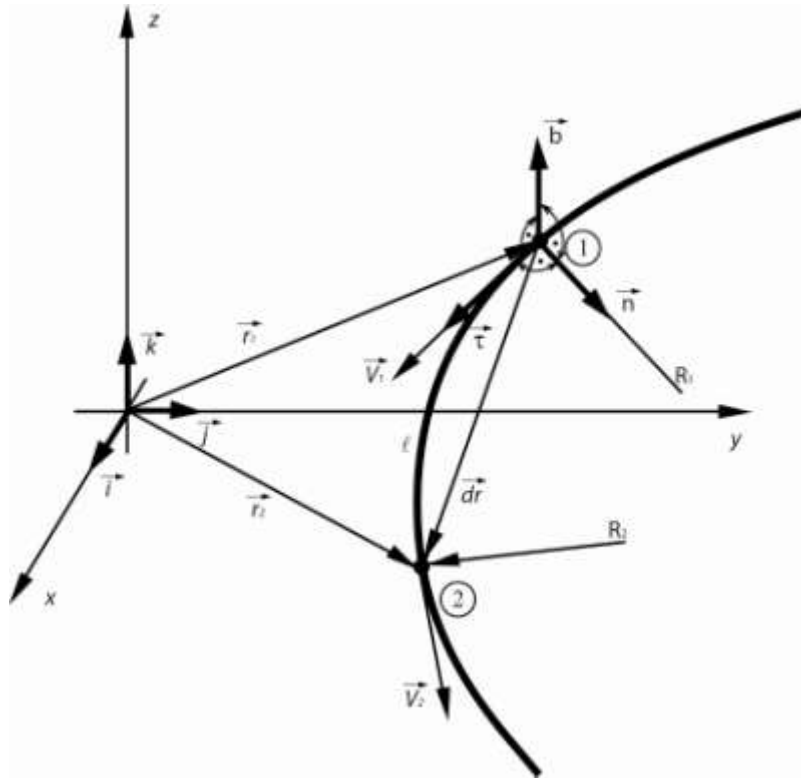


Рисунок 4

$$\vec{r}(t) = x(t)\vec{i} + y(t)\vec{j} + z(t)\vec{k}, \quad (4.3)$$

где: $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$ - функции, характеризующие изменение положения движущейся точки во времени в рассматриваемой системе координат.

Вектор ускорения

$$\vec{a} = \frac{dv}{dt} = \frac{d}{dt}(v\vec{\tau}) = \frac{dv}{dt}\vec{\tau} + v\frac{d\vec{\tau}}{dt}, \quad (4.4)$$

где: v - скорость движения экипажа по стрелочному переводу.

$$\vec{h} = \frac{d\vec{a}}{dt} = \frac{d}{dt}(a_{\tau})\vec{\tau} + a_{\tau}\frac{d}{dt}(\vec{\tau}) + \frac{d}{dt}(v^2)q\vec{n} + v^2\frac{d}{dt}(q)\vec{n} + v^2q\frac{d}{dt}(\vec{n}). \quad (4.5)$$

Скорость
нарастания
ускорения
(\vec{h} - вектор)

Составляющие \vec{h} - вектора

$$\vec{h} = \left(\frac{da_{\tau}}{dt} + v^3q^2\right)\vec{\tau} + (3va_{\tau}q + v^3\frac{dq}{dl})\vec{n} + (v^3c'q)\vec{b}. \quad (4.6)$$

продольная составляющая	поперечная составляющая	вертикаль- ная состав- ляющая
----------------------------	----------------------------	-------------------------------------

где: q - кривизна кривой ($q = 1/R$);

c - кривизна кривой в вертикальной плоскости.

Из трех составляющих воздействия нас интересует составляющая, действующая в горизонтальном поперечном направлении, которая при постоянной скорости движения по стрелочному переводу равна

$$h = v^3\frac{dq}{dl}. \quad (4.7)$$

Если рассматривать движение не точки, а экипажа с базой d , то при входе с прямой в кривую получим

$$h = \frac{v^3}{Rd}. \quad (4.8)$$

Величины действующих и нормируемых величин ускорений \vec{a} и \vec{h} - векторов определяют выбор и радиусы стрелочных кривых, обеспечивающих плавность проезда по стрелочному переводу.

В практике проектирования стрелочных переводов используются две основные концепции.

4.2.2. Проектирование стрелочных кривых исходя из нормирования нескомпенсированного ускорения

При движении по кривым возникает центробежное ускорение, зависящее от скорости и радиуса кривой. Для компенсации вызываемых им сил, в кривых устраивается возвышение наружного рельса. В стрелочной кривой возвышение не устраивается, поэтому нескомпенсированная часть ускорения может выражаться в виде недостатка возвышения.

Величину радиуса, исходя из допустимой величины недостатка возвышения, можно определить из выражения

$$R_0 = \frac{12,5v_{\max}^2}{H}, \quad (4.9)$$

где v_{\max} - максимальная скорость движения;
 H - допустимая величина недостатка возвышения.

Конструкция таких стрелочных кривых следующая.

Вход на стрелочную кривую, в пределах зоны набегания колес на острьяк, выполняется постоянным радиусом. Начальный стрелочный угол и угол удара колес в криволинейный острьяк определяется исходя из нормируемых величин потери кинетической энергии и внезапно появляющегося ускорения по обычным методикам (см. раздел 4.1).

Радиус R_1 является минимальным. За пределами зоны набегания колес на криволинейный острьяк радиус стрелочной кривой плавно увеличивается до величины $R_2 = \infty$ в середине съезда или в конце крестовины. Прямая вставка может не устраиваться. Отвод кривизны, как правило, производится с изменением кривизны по кубической параболе или клотоиде.

Интенсивность отвода эквивалентна интенсивности отвода возвышения наружного рельса.

Исходя из допускаемой величины этого показателя длина отвода определяется по формуле:

$$L = Hv_{\max} / (\Delta i / \Delta t). \quad (4.10)$$

4.2.3. Проектирование стрелочных кривых, исходя из анализа изменения кинематических параметров движущегося экипажа

При высоких скоростях движения динамические параметры взаимодействия пути и экипажа пропорциональны второй и третьей производным вектора перемещения (горизонтальному поперечному ускорению и скорости его изменения).

При исследовании кинематики движения со скоростями более 60 км/ч, \vec{h} - вектор является определяющим (для стрелочных переводов).

Если считать скорость движения по стрелочному переводу постоянной, то для расчетов движения следует применять формулы (4.7 и 4.8).

В принципе эти соотношения позволяют проектировать кривизну стрелочной кривой по нормируемой величине модуля \vec{h} -вектора (4.7) соответствует движению по стрелочной кривой точечного экипажа. Поэтому при практическом определении параметров, нужно исходить из того, что элементом, воспринимающим закругления пути, является база экипажа.

Формула (4.8) дает возможность определить начальный радиус острьяков и совместно с (4.7) произвести подбор стрелочной кривой. Однако, анализ практических реализаций этой методики показывает, что при практическом анализе входа на стрелку, в расчет наибольшего допускаемого угла удара необходимо вводить упрощения.

$$k \approx \frac{\tau}{d}, \quad \frac{dk}{dl} \approx \frac{\Delta k}{\Delta l} \approx \frac{\tau}{d^2}, \quad (4.11)$$

где τ - угол удара в остряк.

В результате соотношение получаем

$$h \approx v^3 \frac{\tau}{d^2}. \quad (4.12)$$

Из этого соотношения находится наибольший допустимый угол удара в остряк.

В применяемых в настоящее время стрелочных переводах используются разные варианты геометрии острьяков. Наиболее распространены остряки, выполненные по одной из следующих схем:

- остряки с постоянной или скачкообразной изменяющейся кривизной, однорадиусные, двухрадиусные;
- клотоидные с увеличением кривизны, с уменьшением кривизны;
- комбинированные;
- остряки в виде комбинации клотоиды и круговой кривой с увеличением кривизны, или с уменьшением кривизны;
- остряки с косинусоидальным изменением кривизны с нулевой начальной кривизной, или с ненулевой начальной кривизной.

Каждый из названных видов острьяков может быть выполнен по касательной или секущей схеме. Кроме того, для каждого вида возможны различные подвиды, связанные с оформлением практического остряка остряка.

Выполнение динамико-кинематических требований, обеспечивающих плавность проезда по стрелочному переводу можно обеспечить применением практически всех названных схем, поэтому в процессе проектирования стрелочного перевода и особенно съезда должны быть рассмотрены и сопоставлены конструктивные решения всех этих видов. Наилучшим вариантом является тот, который при выполнении всех условий обеспечивает минимальные длину и стоимость стрелочного перевода или съезда.

Проектирование стрелочной кривой на острьяке можно производить отдельно. Общая математическая формулировка оптимизационной задачи, пригодная для всех вариантов, имеет вид

$$\begin{aligned} \min \{L_0(k,n), L_c(k,n)\}, \\ \left| \frac{dv}{dt} \right|_b \leq a_b, \\ \left| \frac{dv}{dt} \right|_r = a_y, \\ \left| \frac{d^2v}{dt^2} \right|_k \leq h, \\ \left| \frac{d^2v}{dt^2} \right|_d \leq \psi, \end{aligned} \quad (4.13)$$

где: L_0 - длина остряка; L_c - длина его строжки; n - засечка (для остряков секущего типа); a_b - предельное значение внезапно появляющегося ускорения; a_n - предельное значение установившегося ускорения для вариантов, имеющих участки постоянной кривизны, или наибольшее ускорение для кривой переменной кривизны; ψ - нормируемая скорость нарастания ускорения на участке входа на стрелочную кривую.

Выбор величин предельных значений ограничений определяет качество технического решения.

Величины внезапно появляющегося ускорения и предельного ускорения следует принимать на основании имеющегося опыта проектирования.

Стрелочная кривая за корнем остряка продолжает собой кривую в пределах остряка. Ее параметры определяются значением нормируемой скорости нарастания ускорения и предельным значением установившегося ускорения. После достижения предельного значения ускорения (установившегося) кривая может иметь участок постоянной кривизны.

Прилегающие к нему участки имеют переменную кривизну, зависящую, как уже указывалось, от скорости нарастания ускорения. Затем следует участок кривой, обеспечивающий симметричные, или не хуже, условия входа в кривую, чем на стрелке. После этого в пределах стрелочного перевода располагается прямая вставка (ее может не быть), сопрягающая смежные стрелочные переводы съезда.

Длина прямой вставки принимается, как функция от скорости движения

$$\min L_{bc} = m v \quad (4.14)$$

Коэффициент m зависит от скорости и стесненности условий движения.

Величина L_{bc} может ограничиваться снизу условиями минимальной длины рельсового элемента или иными условиями. Имеются рекомендации устраивать прямые вставки длиной не менее базы экипажа.

Поскольку возможны различные комбинации сочетаний участков составляющих съезд, то задача проектирования стрелочной кривой вне остряка также представляет собой оптимизационную задачу. Ее математическая формулировка выглядит следующим образом

$$\begin{aligned} \min \sum_j L, \\ \alpha_i(v, \frac{dv}{dt}, \frac{d^2v}{dt^2}) < [\alpha]_i, i = 1, \dots, 4 \\ L_{bc} \geq \min L_{bc} \\ L_k \geq \frac{a_y - a_b}{n}, \end{aligned} \quad (4.15)$$

где: $\sum L$ - длина стрелочного перевода (съезда);
 L_{bc} - длина прямой вставки;
 L_k - длина клотоидного участка;
 α_i - динамико-кинематические критерии;
 $(a_y - a_b)$ - приращение ускорений на участке кривой переменной кривизны.

Нормирование и определение показателей, обеспечивающих плавность проезда подвижного состава по крестовинному узлу, при движении на боковое направление стрелочных переводов, осуществляется по методикам, изложенным в разделах 3.3 и 3.4 настоящей памятки.