

ФОРМАЛИЗОВАННОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ И РАСЧЕТ ПЛАНОВ ПУТЕВОГО РАЗВИТИЯ КРУПНЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СТАНЦИЙ

Розроблено методику побудови масштабних планів колійного розвитку великих станцій, що складаються з декілька парків, а також розташованих у кривих. Наведено процедуру автоматизованого розрахунку корисних довжин колій станцій, що використовується при побудові планів.

Разработана методика построения масштабных планов путевого развития крупных станций, состоящих из нескольких парков, а также расположенных на кривых. Приведена процедура автоматизированного расчета полезных длин путей станции, используемая при построении планов.

The technique for construction of scale plans of the track development of large stations consisting from a few parks and the ones located on curves is developed. The procedure of automated calculation of useful lengths of the station tracks, used at the construction of plans, is given.

Пропускная и перерабатывающая способность железнодорожных станций и узлов, эффективность их эксплуатации напрямую зависят от оптимальности решений, принятых при проектировании. Существенное повышение качества проектирования, увеличение производительности труда проектировщиков может быть достигнуто в результате внедрения новой информационной технологии, основой которой является система автоматизированного проектирования (САПР). Одной из основных проблем теории САПР является разработка эффективных математических моделей проектируемых объектов и алгоритмов выполнения проектных процедур. Эта задача является особенно важной для проектирования железнодорожных станций и узлов, что объясняется высокой стоимостью их строительства и реконструкции, длительным сроком эксплуатации, невозможностью построения физических моделей.

При проектировании железнодорожных станций и узлов наиболее массовыми и трудоемкими являются расчеты соединений путей, что обусловило разработку программ и использование ЭВМ для выполнения этих расчетов.

В указанной задаче существует две основные проблемы: формализация схемы станции и ее исходных параметров для ввода в ЭВМ; разработка алгоритма анализа модели для расчета выходных параметров.

Вопросам формализации схем станций для автоматизации расчетов и проектирования посвящено достаточно большое число научных работ [1 – 5]. В указанных работах разработаны методы представления схем станций в виде оп-

ределенных структур, содержащих информацию о плане станции и ее элементов. В указанных работах необходимо отметить системный подход к проектированию, позволяющий выполнить расчет координат точек станции, построение ее масштабного плана, а также оценку технологических показателей на основе имитационного моделирования. К недостаткам работ следует отнести высокую сложность и трудоемкость подготовки и ввода в ЭВМ формализованных данных о схеме станции.

В работах [5, 6] предложена система структурно-параметрических моделей станций (входная, внутренняя и выходная модели), а также алгоритмы выполнения проектных процедур, которые позволяют автоматизировать процесс синтеза путевого развития станций на всех его этапах. В основу моделей положено представление схем станций в виде ориентированных графов. При этом в указанных работах не решена задача формализации моделей крупных станций, состоящих из нескольких парков, в том числе расположенных на кривых.

В этой связи в данной статье поставлена задача усовершенствования структурно-параметрических моделей, предложенных в [5, 6], с целью формализованного представления и автоматизированного проектирования крупных железнодорожных станций, а также станций, расположенных на кривых.

Внутренняя модель станции включает каноническую модель и модель ее горизонтальных путей. Каноническая модель отображает топологическую структуру станции и представляет собой ориентированный граф $G = (V, E)$, в ко-

тором выделено три подмножества вершин: V^S , V^C и V^W . Вершины $v_i \in V^S$ являются центрами стрелочных переводов (ЦП), вершины $v_j \in V^C$ – вершинами углов поворота кривых (ВУ), вершины $v_k \in V^W$ – концами путей (КП). Дугам графа $e = (v, u)$ соответствуют участки путей, соединяющих вершины. Принято, что все дуги ориентированны слева направо.

Горизонтальные пути станции представлены вершинами древовидного графа $D = (W, H)$, ребрам которого поставлены в соответствие заданные междупутья.

Построение плана путевого развития сложных станций осуществляется путем объединения отдельных базовых элементов (блоков) в единую интегрированную модель в некоторой глобальной системе координат. Для включения очередного блока в общую совокупность необходимо преобразовать координаты его вершин из локальной системы координат в глобальную, а также выполнить сопряжение соответствующих путей с помощью круговых кривых.

Для выполнения преобразований координат удобно представить все характерные точки блока однородными координатами [7], которые точку $P(x, y)$ описывают трехэлементной вектор-строкой $[x \ y \ 1]$. Тогда преобразование координат точки P осуществляется умножением вектора точки на матрицу преобразования C размером 3×3 :

$$[x' \ y' \ 1] = [x \ y \ 1] \cdot \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix}$$

Матрица преобразования C , может быть получена путем умножения матриц трех элементарных преобразований:

- перенос опорной точки $P_0(x_0, y_0)$ в начало координат локальной системы Σ_i ;
- поворот локальной системы Σ_i на угол φ_i ;
- перенос начала координат локальной системы Σ_i в точку $P_0(X_0, Y_0)$ глобальной системы.

Указанная матрица преобразования может быть получена умножением матриц данных элементарных преобразований и имеет вид:

$$C = \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi & 0 \\ -\sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ A & B & 1 \end{bmatrix}$$

где $A = -x_0 \cos \varphi + y_0 \sin \varphi + X_0$;

$B = -x_0 \sin \varphi - y_0 \cos \varphi + Y_0$.

Структура последнего столбца матрицы позволяет упростить фактически выполняемые

действия при преобразованиях координат:

$$\begin{aligned} x' &= c_{11}x + c_{21}y + c_{31}; \\ y' &= c_{12}x + c_{22}y + c_{32}, \end{aligned} \quad (1)$$

где c_{ij} – коэффициенты результирующей матрицы преобразования C , которые вычисляются однократно для всех точек блока;

x, y – координаты опорной точки.

Расчет координат (1) выполняется для всех вершин блока; при этом координаты базовой вершины соответствуют координатам (X, Y) точки размещения блока на общем плане станции.

При проектировании плана путевого развития станции из отдельных базовых элементов, оси путей объединяемых блоков могут располагаться под углом друг к другу или на одной прямой. В первом случае необходимо выполнить сопряжение соответствующих путей, т.е. определить точки их пересечения (ВУП) и параметры сопрягающих круговых кривых.

Для определения точки пересечения каждый из пары сопрягаемых путей представляется параметрическим уравнением $P(t)$ прямой, проходящей через некоторые две точки (вершины) $a = (x_a, y_a)$ и $b = (x_b, y_b)$ этого пути:

$$P(t) = \begin{cases} x_a + t(x_b - x_a); \\ y_a + t(y_b - y_a), \end{cases} \quad (2)$$

где t – вспомогательный параметр.

Параметр t может принимать любое значение из множества действительных чисел $t \in R$. Если значения параметра t ограничены диапазоном $[0; 1]$, то уравнение (2) описывает отрезок ab , принадлежащий прямой линии \overline{ab} .

Учитывая, что вершина КП имеет единственную входящую или исходящую дугу, необходимо на графе G определить другую вершину, инцидентную этой дуге, и с ее помощью составить уравнение прямой (2).

С использованием теоремы о скалярном произведении векторов [7] получено выражение для определения значения параметра t , соответствующего точке пересечения $v(t)$ двух прямых линий \overline{ab} и \overline{cd} :

$$t = \frac{\mathbf{q}(a-c)}{\mathbf{q}(b-a)},$$

где \mathbf{q} – вектор, перпендикулярный прямой \overline{cd} .

Если $\mathbf{q} \cdot (b-a) = 0$, то вектор \mathbf{q} перпендикулярен прямой \overline{ab} . Это свидетельствует о том, что прямые \overline{ab} и \overline{cd} не имеют точки пересече-

ния, т.е. параллельны или совпадают. В противном случае (прямые \overline{ab} и \overline{cd} пересекаются) координаты точки пересечения v (см. рис. 1) можно определить путем подстановки рассчитанного значения параметра t в выражение (2).

Для определения угла поворота сопрягающей кривой используется выражение:

$$\varphi = \theta_{ev} - \theta_{fv},$$

где θ_{ev} , θ_{fv} – соответственно углы наклона отрезков ev и fv (см. рис. 1)

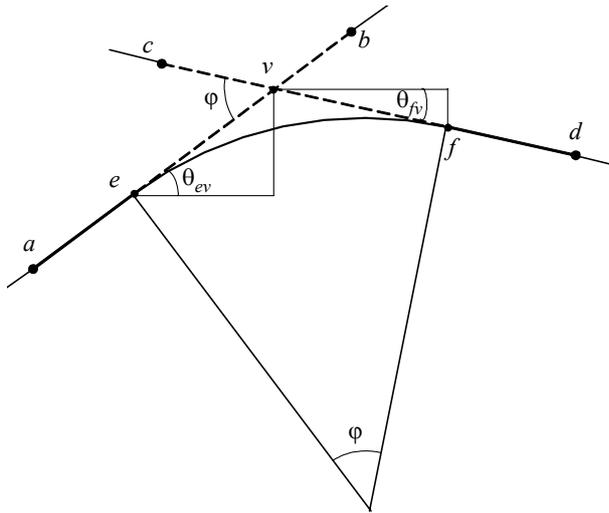


Рис. 1. Схема определения угла поворота кривой

В свою очередь, угол наклона некоторого отрезка ab определяется как:

$$\theta_{ab} = \arcsin \left(\frac{y_b - y_a}{\sqrt{(x_b - x_a)^2 + (y_b - y_a)^2}} \right).$$

После определения угла поворота кривой рассчитываются ее остальные параметры – тангенс T и длина K кривой (см. рис. 2, а).

При объединении блоков, оси сопрягаемых путей которых лежат на одной прямой, угол поворота $\varphi = 0$ и точки пересечения определять не нужно. В этом случае необходимо соединить соответствующие вершины отрезком прямой (см. рис. 2, б).

В результате объединения блоков формируется модель интегрированного блока, которая имеет такую же структуру и может быть использована для создания более сложных объектов. С этой целью формируется ориентированный граф G с перенумерованными вершинами, среди которых выделяется базовая вершина v_6 ; созданному таким образом блоку присваивается уникальный номер (имя) блока N_6 .

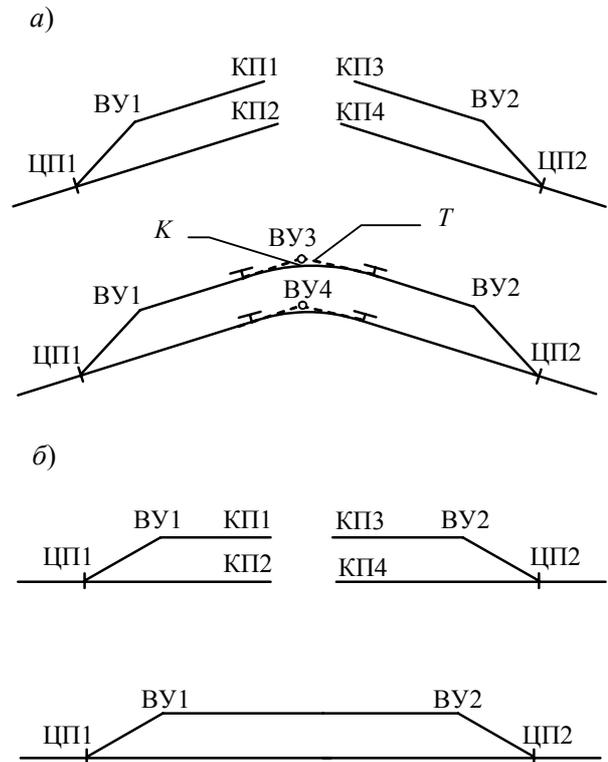


Рис. 2. Объединение блоков: а) расположенных под углом друг к другу; б) расположенных на одной прямой

При объединении блоков в интегрированный блок необходимо обеспечить требуемую полезную длину всех станционных путей. Формально данное требование можно выразить условием

$$L_{фпд i} \geq L_{пнд i}, \quad i = 1, \dots, n, \quad (3)$$

где $L_{фпд i}$, $L_{пнд i}$ – соответственно, фактическая и потребная полезные длины i -го пути;

n – число путей станции.

При этом, учитывая особенности конструкции горловин станций, условие (3) для части путей будет являться равенством ($L_{фпд i} = L_{пнд i}$), а для большинства путей – строгим неравенством ($L_{фпд i} > L_{пнд i}$). В этой связи при проектировании станций необходимо выделить пути с минимальной полезной длиной, для которых выполняется равенство $L_{фпд i} = L_{пнд i}$, обеспечить им потребную полезную длину, после чего определить полезные длины остальных путей.

Сложность данной задачи заключается в том, что путей с минимальной полезной длиной на станции может быть несколько (например, при наличии нескольких парков). Кроме того, правильный выбор пути с минимальной полезной длиной осуществить без выполнения расчетов координат элементов станции (парка) не представляется возможным; в то же время для

выполнения указанных расчетов необходимо предварительно установить потребные длины путей.

Автоматизированное решение этой противоречивой задачи для отдельного парка станции может быть выполнено в четыре этапа:

1) определение координат точек одной из горловин парка;

2) определение координат точек другой горловины при заданной длине одного из путей парка (расчетного пути);

3) расчет полезных длин путей парка;

4) определение потребного изменения длины расчетного пути и повторный расчет координат всех точек парка.

Для станций сложной конструкции, состоящих из нескольких групп путей (парков) с различными потребными полезными длинами, расчет выполняется последовательно для каждой группы путей, которые выделяются автоматически.

Фактические полезные длины путей парка могут быть определены при известных координатах точек обеих его горловин; при этом для автоматизации расчетов необходимо разработать методику решения следующих задач:

- поиск на ориентированном графе станции дуг, соответствующих путям, для которых должна быть определена полезная длина (в дальнейшем – пути);

- поиск вершин, ограничивающих конструктивную длину пути;

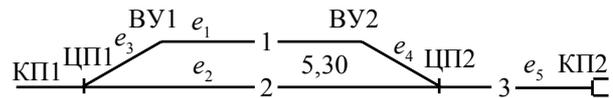
- поиск на конструктивной длине пути точек, ограничивающих его полезную длину в заданном направлении;

- определение численного значения полезной длины пути.

Идентификация дуг графа, являющихся путями, осуществляется на основе анализа специального параметра μ , который присваивается во входной модели станции каждой дуге для определения метода расчета длины соответствующего отрезка. Путями считаются дуги, у которых данный параметр имеет некоторое значение, определяющее необходимость расчета полезной длины пути в соответствующем направлении. Так, в результате поиска на графе, представленном на рис. 3, дуги e_1 , e_2 и e_5 будут классифицированы как станционные пути, поскольку для них $\mu_i \neq 0$.

После определения дуги e_n , являющейся станционным путем или его частью, необходимо найти две вершины графа, ограничивающие его конструктивную длину. Данными вершинами могут быть только ЦП и КП; поиск вершин данного типа производится в обе стороны

от концов найденной дуги e_n . Так, на графе, представленном на рис. 3, для дуги e_2 поиск не производится, поскольку ее начальная и конечная вершины являются ЦП; для дуги e_1 будут найдены связанные с ней дуги e_3 и e_4 и, соответственно, начальная (ЦП1) и конечная (ЦП2) вершины, определяющие конструктивную длину пути 2. Численное значение конструктивной длины пути определяется суммированием длин входящих в нее элементов (отрезков, кривых), которые соответствуют входящим в нее дугам.



№ пути	дуги	μ
1	$e_3 = (\text{ЦП1}, \text{ВУ1})$ $e_1 = (\text{ВУ1}, \text{ВУ2})$ $e_4 = (\text{ВУ2}, \text{ЦП2})$	0 μ_1 0
2	$e_2 = (\text{ЦП1}, \text{ЦП2})$	μ_2
3	$e_5 = (\text{ЦП2}, \text{КП2})$	μ_3

Рис. 3. Представление путей на ориентированном графе

Полезная длина станционного пути может ограничиваться сигналом, предельным столбиком, упором или стыком рамного рельса стрелочного перевода (ЦП). Методика определения положения предельных столбиков и сигналов на основе математической модели путевого развития в виде ориентированного графа приведена в [9].

Если границей конструктивной длины пути является упор, то координаты соответствующей вершины графа ограничивают и полезную длину этого пути. В случае если границей конструктивной длины пути является ЦП ($v_i \in V^S$), для определения вершины, ограничивающей его полезную длину, необходимо предварительно установить направление z_i входа этого пути в стрелочный перевод v_i [9]. Далее в списке сигналов производится поиск сигнала g , для которого выполняются условия:

$$\begin{cases} v_g = v_i; \\ z_g = z_i. \end{cases}$$

Если такой сигнал найден, то полезная длина пути определяется положением данного сигнала; в противном случае при $z \in [0, 1]$ полезная длина будет ограничиваться предельным столбиком (ПС), а при $z = 2$ – изолированным стыком рамного рельса стрелочного перевода v_i .

Окончательно фактическая полезная длина $L_{\text{фпд}}$ станционного пути рассчитывается по формуле:

$$L_{\text{фпд}} = L_{\text{к}} - l_{\text{л}} - l_{\text{п}},$$

где $L_{\text{к}}$ – конструктивная длина пути;

$l_{\text{л}}, l_{\text{п}}$ – расстояния между точками, ограничивающими конструктивную и полезную длины пути, соответственно, слева и справа.

Значения величин $l_{\text{л}}, l_{\text{п}}$ в зависимости от параметра z могут быть равны элементу a стрелочного перевода, либо расстоянию $l_{\text{пс}}$ от ЦП до ПС (расстоянию $l_{\text{св}}$ от ЦП до сигнала при его наличии); если конструктивная длина пути ограничивается упором, то соответствующее значение $l_{\text{л}}$ или $l_{\text{п}}$ равно нулю.

Определение потребных полезных длин путей станции производится в комплексе с расчетом координат точек плана; решение данной задачи осуществляется в следующей последовательности.

На *первом* этапе на базе орграфа станции G для одной горловины парка строится остовное дерево $U = (V, E_U)$ с корнем в вершине v_0 , являющейся опорной точкой плана. В дерево U включаются те дуги, которые представляют отрезки с известными длинами, определенными в процессе расчета плана станции; при этом дуги, соответствующие путям заданной длины ($\mu > 0$), в дерево U не включаются. Далее, начиная с опорной точки, выполняется расчет координат точек плана, соответствующих вершинам построенного остовного дерева. Так, на графе станции, представленном на рис. 4, *а*, будет построено остовное дерево с корнем в вершине ЦП1 и определены координаты точек КП1, ЦП2 и ВУ1 (см. рис. 4, *б*).

На *втором* этапе среди вершин построенного остовного дерева выделяется вершина, исходящая дуга которой является путем с заданной во входной модели расчетной длиной L_p (расчетный путь). Так, например, на графе рис. 4, *б* выделена вершина ЦП1 с исходящей дугой ЦП1–ЦП4 (расчетный путь 1), определяющей полезные длины путей парка 1. Найденная дуга включается в остовное дерево U .

Далее продолжается построение остовного дерева, в которое включаются все новые дуги исходного графа с известными длинами, связанные с дугой расчетного пути. Таким образом, на втором этапе будет построено остовное дерево U , которое включает все вершины обеих горловин парка станции (в рассматриваемом примере на рис. 4, *в* – вершины ЦП1, ЦП2, ЦП3, ЦП4, ЦП5 и ВУ1, ВУ2, ВУ3). После построения дерева в завершение второго этапа

определяются координаты точек, соответствующих всем вновь включенным вершинам (вершины – ЦП4, ВУ3, ЦП5, ЦП3, ВУ2).

На *третьем* этапе производится поиск на графе дуг, являющихся путями (рис. 4, *в*, дуги ЦП1–ЦП4, ЦП2–ЦП3 и ЦП2–ВУ1–ВУ2–ЦП3), и по установленным координатам точек плана станции определяются полезные длины соответствующих путей (пути 1 – 3).

На *четвертом* этапе осуществляется корректирование полезных длин всех путей парка таким образом, чтобы фактическая полезная длина каждого пути была не менее потребной полезной длины этого пути ($L_{\text{фпд}i} \geq L_{\text{ппд}i}$).

В этой связи для каждого из путей парка производится расчет отклонения ΔL_i фактической полезной длины от потребной $\Delta L_i = |L_{\text{ппд}} - L_{\text{фпд}i}|$. Очевидно, что максимальное отклонение $\Delta L_{\text{max}} = \max \{\Delta L_1, \dots, \Delta L_n\}$, где n – число путей в парке, определяет необходимое увеличение длины всех путей группы, обеспечивающее требуемую полезную длину этих путей.

В завершение четвертого этапа увеличиваются на ΔL_{max} значения координат точек плана станции, определенных на втором этапе, и, соответственно, полезные длины путей группы.

В дальнейшем на графе станции осуществляется поиск новых вершин, включенных в построенное остовное дерево, с исходящими дугами, которые являются путями, не включенными в дерево. Такими на графе (см. рис. 4, *в*) являются вершина ЦП5 с исходящей дугой ЦП5–ЦП6 (путь 4) и вершина ВУ3 с исходящей дугой ВУ3–ВУ4. Наличие таких вершин свидетельствует о существовании в графе еще одной группы взаимосвязанных путей, расчеты для которой также выполняются в четыре этапа изложенным выше порядком.

Отсутствие подобных вершин в полученном остовном дереве означает завершение его построения и окончание всех расчетов.

В результате выполненных теоретических исследований были разработаны методика построения структурно-параметрических моделей крупных станций, а также соответствующие программные модули, встроенные в типовую оболочку автоматизированного проектирования AutoCAD. Как показала проверка, использование модернизированного пакета обеспечивает существенное сокращение времени построения масштабных планов путевого развития железнодорожных станций. Это позволяет значительно увеличить число рассматриваемых вариантов развития станций и, тем самым, существенно повысить качество проектирования.

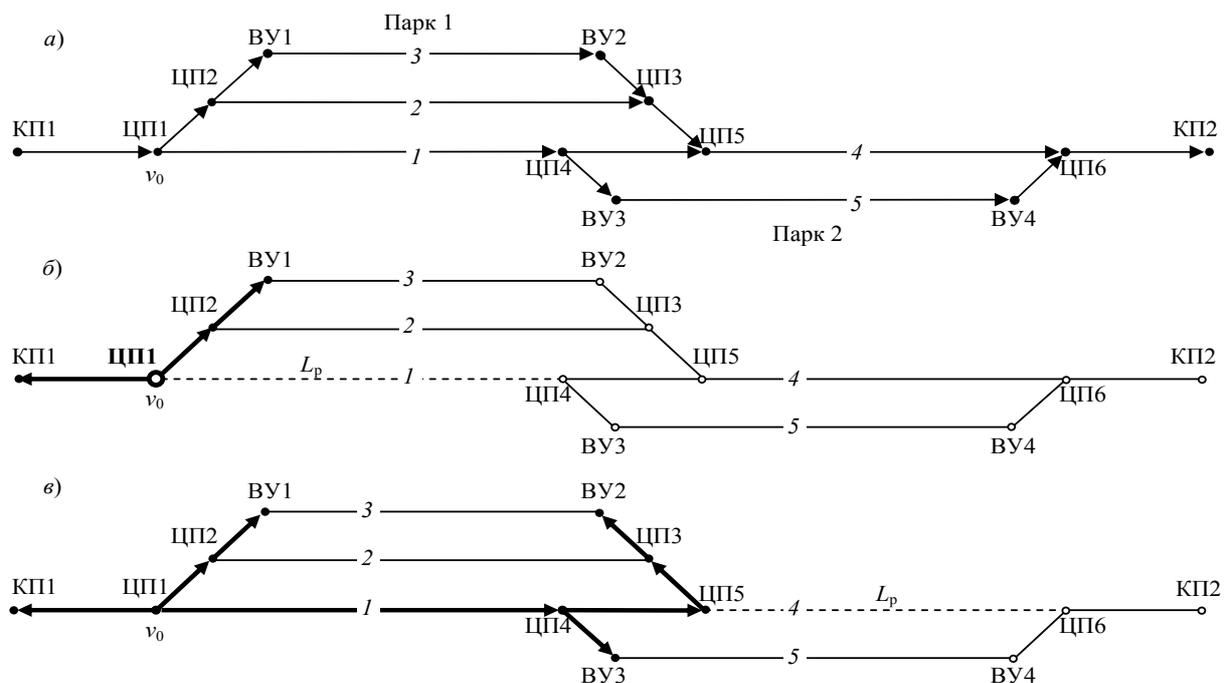


Рис. 4. Последовательность расчета полезных длин путей:
 а) исходный граф станции; б) остовное дерево для одной горловины парка с корнем в опорной вершине v_0 ; в) остовное дерево для расчета длин группы путей 1–3

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алаев, М. М. Формализация элементов схем станций для расчетов на ЭВМ [Текст] / М. М. Алаев // Проблемы наращивания мощности станций и узлов: межвуз. сб. науч. тр. – Вып. 765. – М.: МИИТ, 1985. – С. 58-59.
2. Корешков, В. Н. Способ представления схемы сортировочной станции в ЭВМ [Текст] / В. Н. Корешков // Проблемы перспективного развития железнодорожных станций и узлов: межвуз. сб. науч. тр. – Гомель: БелИИЖТ, 1985. – С. 91-96.
3. Чернов, В. Н. Формализация схем железнодорожных станций для графического отображения на ЭВМ [Текст] / В. Н. Чернов, В. С. Пивоваров // Вопросы совершенствования системы автоматизированного проектирования железнодорожных станций и узлов: межвуз. сб. науч. тр. – Вып. 214/54. – Ташкент: ТашИИТ, 1989. – С. 8-13.
4. Головнич, А. К. Автоматизированное проектирование железнодорожных станций [Текст] / А. К. Головнич. – Гомель: БелГУТ, 2001. – 202 с.
5. Бобровский, В. И. Структурные модели путевого развития железнодорожных станций для автоматизированного проектирования [Текст] / В. И. Бобровский // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. – 1997. – № 3. – С. 58-63.
6. Бобровский, В. И. Теоретические основы совершенствования конструкции и технологии работы железнодорожных станций [Текст]: автореф. дисс. ... докт. техн. наук / Бобровский Владимир Ильич; Днепропетр. нац. ун-т железнодорожного трансп. – Д., 2002. – 36 с.
7. Фоли, Дж. Основы интерактивной машинной графики [Текст]: в 2-х кн. / Дж. Фоли, А. вэн Дэм. – Кн. 1. – М.: Мир, 1985. – 368 с.
8. Майкл, Ласло. Вычислительная геометрия и компьютерная графика на C++ [Текст] / Ласло Майкл. – М.: БИНОМ, 1997. – 304 с.
9. Бобровский, В. И. Определение положения предельных столбиков и сигналов при автоматизированном проектировании железнодорожных станций [Текст] / В. И. Бобровский, Д. Н. Козаченко // Заліз. трансп. України. – 2004. – № 4. – С. 14-16.

Поступила в редколлегию 14.07.2009.
 Принята к печати 23.07.2009.