УДК 625.721:630*383

МЕТОДЫ СГЛАЖИВАНИЯ ЭСКИЗНОЙ ЛИНИИ ТРАССЫ ЛЕСОВОЗНОЙ АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ

¹Скрышников А.В., ²Чирков Е.В., ³Козлов В.Г., ¹Боровлев А.О., ¹Саблин С.Ю.

¹ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий»,
Воронеж, e-mail: skrypnikovvsafe@mail.ru;

²ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет
имени Г.Ф. Морозова», Воронеж, e-mail: skrypnikovvsafe@mail.ru;

³ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет
имени императора Петра I», Воронеж, e-mail: vya-kozlov@yandex.ru

Исследованию методов проектирования в плане посвящены работы ряда авторов, как в России, так и за рубежом. Предложено несколько методов проектирования трассы лесовозных автомобильных дорог с применением информационных технологий, отличающихся постановкой задачи, способами их решения, характером геометрического представления трассы и другими особенностями. В нашей работе не ставится задача исследования особенностей применения различных типов переходных кривых, а также назначения их параметров из условия обеспечения наилучшего режима движения лесовозного подвижного состава по ним или с точки зрения создания зрительной плавности дороги. Поскольку в подавляющем большинстве стран, в том числе и в России, в качестве переходных кривых приняты клотоиды, то в настоящей работе основное внимание уделено исследованию методов сглаживания эскизной линии трассы лесовозной автомобильной дороги при проектировании. Анализ представленного материала позволяет сделать вывод, что для окончательного трассирования применение на этапе предварительной проработки трассы лесовозной автомобильной дороги методов сглаживания, с использованием полиномов или для получения приближения при последующей аппроксимации трассы круговыми кривыми, клотоидами и прямыми, в полной мере нельзя применять.

Ключевые слова: трасса, лесовозная автомобильная дорога, клотоида, режим движения, плавность

METHODS FOR SMOOTHING THE OUTLINE LINE OF A LOGGING HIGHWAY ROUTE

¹Skrypnikov A.V., ²Chirkov E.V., ³Kozlov V.G., ¹Borovlev A.O., ¹Sablin S.Yu.

¹Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh, e-mail: skrypnikovvsafe@mail.ru;

²Voronezh State Forestry Engineering University named after G.F. Morozov, e-mail: skrypnikovvsafe@mail.ru;

³Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great,
Voronezh, e-mail: vya-kozlov@yandex.ru

The research of design methods in the plan is devoted to the work of a number of authors, both in Russia and abroad. Several methods of designing the route of logging roads using information technologies are proposed, which differ in the problem statement, methods of solving them, the nature of the geometric representation of the route, and other features. In our work we do not aim to study the characteristics of different types of transitions and assign their parameters to provide the best mode of movement of hauling rolling stock thereon, or from the point of view of creating a visual smoothness of the road. Since in the vast majority of countries, including Russia, clothoids are used as transition curves, this paper focuses on the study of methods for smoothing the sketch line of the route of a logging highway when designing. Summing up the analysis of smoothing methods using polynomials, we can conclude that these methods can be used at the stage of preliminary study of the route or to obtain the initial approximation for subsequent approximation of the route by clothoids, circular curves, and straight lines, and cannot be used for final tracing.

Keywords: highway, logging road, clothoid, traffic mode, smoothness

В отечественной практике проектирования трассы лесовозной автомобильной дороги принят метод расчета, который был также широко распространен и за рубежом до массового внедрения автоматизированных методов проектирования. Этот метод основан на расчете закруглений вида клотоида – круговая, кривая – клотоида или клотоида – клотоида, вписываемых в углы тангентального полигона, обычно прокладываемого на местности.

Особенностями применяемых в настоящее время методов сглаживания эскизной

линии трассы лесовозной автомобильной дороги является то, что из графического проекта берется такое количество данных, чтобы последовательность элементов трассы и их геометрические характеристики устанавливались однозначно, т.е. чтобы не было неопределённостей при аналитическом расчете трассы [1–3]. Вместе с тем, учитывая значительную трудоемкость этапа графической проработки трассы, в последние годы ведутся исследования методов проектирования, позволяющих облегчить его. В работах [3, 4] предлагается отказаться

ся от концепции однозначного решения геометрии трассы, а из графического решения проекта брать больше координат точек, чем это необходимо для однозначного ее определения.

Цель работы заключается в исследовании методов сглаживания эскизной линии трассы лесовозной автомобильной дороги для получения исходного приближения при последующей аппроксимации трассы клотоидами, круговыми кривыми и прямыми.

Проектируемая ось определяется по методу наименьших квадратов с соблюдением условия заданных допусков отклонения проектируемой трассы от заданных точек.

В работе [5] трасса представлена в виде последовательности круговых кривых, клотоид и прямых. С целью анализа линии, нарисованной от руки, рассчитывается и автоматически вычерчивается ее угловая диаграмма, т.е. графическое изображение,

на котором в прямоугольной системе координат по оси абсцисс откладывается длина линии (B) от начала рассматриваемого участка, а по оси ординат – угол наклона касательной в соответствующей точке к оси абсцисс в общей системе координат (φ). Угловая диаграмма эскизной линии аппроксимируется угловой диаграммой допустимых трассировочных элементов и, таким образом, осуществляется выравнивание эскизной линии последовательностью отдельных элементов трассы. Выравнивание на угловой диаграмме проще осуществить, чем выравнивание на оригинале. Так, клотоиду, которая на оригинале не может быть представлена явным аналитическим выражением в прямоугольных координатах, на угловой диаграмме легко описать уравнением параболы, круговую кривую – уравнением наклонной, прямую – линией, параллельной оси абсцисс (таблица).

Диаграммы элементов трассы

Тип элемента	Угловая диаграмма	Диаграмма кривизны
Прямая
Круговая кривая
Клотоида

Анализируя угловую диаграмму совместно с намеченной трассой, проектировщик разбивает трассу на последовательность элементов (клотоид, круговых кривых и прямых) и намечает их ориентировочные границы, определяя тем самым приближенные геометрические характеристики элементов трассы. По установленным границам последовательности элементов и в зависимости от их вида с помощью уравнительного исчисления определяются геометрические характеристики элементов трассы, из условия, что выбранные границы сохраняются неизменными.

Поскольку, однако, эти границы были установлены на глаз, то возможно, что при изменении границ участков можно достигнуть лучшего выравнивания угловой диаграммы эскизной линии прямыми и параболлами. В качестве критерия выравнивания принята сумма квадратов отклонений точек эскизной линии от трассы.

Оптимизация осуществляется итерационным методом. Сначала первая главная точка смещается на величину (Δb) влево и вправо при сохранении всех остальных и регистрируются соответствующие значения критерия. Эта процедура повторяется для второй и каждой последующей точки при сохранении всех остальных в исходном положении. После выполнения этой операции устанавливаются, какая из главных точек имеет наибольшее изменение критерия. Для нее смещают границу участка в сторону, соответствующую уменьшению критерия, и отыскивают положение этой границы, при котором достигается наилучшее сглаживание эскизной линии. Положение соответствующей границы уже не меняется на последующих этапах итерационного расчета.

После снова осуществляют поочередное смещение главных точек (за исключением оптимизированной на предыдущем шаге), и та точка, которая на этот раз имеет максимальное изменение критерия, подвергается оптимизации, как на первом шаге. Таким образом, устанавливается положение всех главных точек. Следует отметить, что данный метод оптимизации, основанный на идеях релаксации, не гарантирует нахождение глобального минимума целевой функции. Кроме того, он не позволяет учитывать ограничения на геометрические характеристики элементов, вследствие чего получаемая в результате расчета трасса может не отвечать нормативным требованиям или соответствующим рекомендациям.

Эти недостатки в значительной степени устранены в методе, изложенном в работе Р. Клумпа [5], представляющем собой развитие работ [6–8], где рассматриваются

методы программы, с помощью которых эскизная линия раскладывается на проектные элементы трассы (круговые кривые, клотоиды и прямые) аналитическим путем. С помощью программы 1 для точек эскизной линии, заданной координатами последовательности точек, рассчитывается и изображается графически не только угловая диаграмма, но и диаграмма кривизны. Под диаграммой кривизны линии понимают графическое изображение, на котором по абсциссе откладывается длина линии, а по ординате – кривизна. Анализируя эти диаграммы и эскизную линию, устанавливают последовательность и ориентировочные границы проектных элементов трассы. Особенно легко это выполнить с помощью диаграммы кривизны, поскольку проектные элементы трассы на ней представлены простыми линейными зависимостями: клотоиды – наклонными прямыми, круговые кривые – прямыми, параллельными оси абсцисс (рисунок).

С целью облегчения выделения элементов трассы программой 1 предусмотрено два этапа сглаживания диаграммы кривизны эскизной линии кусочно-линейной зависимостью.

С помощью программы 2 диаграмма кривизны эскизной линии выравнивается посредством непрерывной последовательности прямых.

Выравнивание может быть осуществлено в двух вариантах:

1) положение главных точек трассы задано фиксированным;

2) положение главных точек переменное, с помощью чего трасса может быть рассчитана с применением либо метода уравнительного исчисления, либо метода Хилдрета и Д'Эзопе [8]. В работе показано, что в случае больших систем со многими линейно-зависимыми уравнениями, то есть при значительном превышении числа задаваемых точек эскизной линии над количеством переменных, трудно, а зачастую и невозможно найти решение с помощью метода уравнительного исчисления путем многократных итераций с изменением веса точек эскизной линии по определенному закону. Поэтому рекомендуется применять в этих случаях оптимизационный метод. Приведенное ниже описание программы 3 относится только к оптимизационному методу, как более совершенному. В качестве переменных могут быть приняты следующие характеристики трассы:

- центральные углы и радиусы круговых кривых;
- длины прямых;
- параметры клотоид;

Сглаживание эскизной линии с использованием угловой диаграммы и диаграммы кривизны

– координаты начальной точки и начальное направление оси.

В качестве ограничений могут быть заданы:

– для определенных точек эскизной линии: а) максимально допустимые расстояния от точки до оси; б) максимальные допуски на изменение координат точки; в) проектные углы наклона касательных в общей системе координат и максимальные допуски на отклонение от этих величин;

– минимально допустимые радиусы элементов;

– минимально допустимые параметры клотоид;

– минимально и максимально допустимые соотношения радиусов и параметров смежных элементов.

Анализ методов проектирования трассы, изложенных в работах [8–10], показывает, что идея, безусловно, прогрессивна и открывает широкие возможности автоматизации проектирования трассы в плане. Однако в рассмотренных методах имеются следующие принципиальные недостатки:

1. Проектирование каждого варианта трассы осуществляется в несколько этапов, что не позволяет существенно сократить сроки и трудоемкость работ.

2. Математические модели целевой функции построены, исходя из предположения, что расстояние между задаваемыми точками эскизной линии приблизительно одинаковое, а изменение угла наклона касательной в смежных точках эскизной линии незначительно.

3. Хотя в принципе параметры клотоид и могут быть приняты в качестве переменных, но сходимость метода в этом случае не обеспечивается, поэтому в работах [11, 12] не рекомендуется использовать параметры клотоид в качестве переменных. Это также ограничивает возможность рассматриваемого метода.

Инженер В. Калогеро предложил метод полиномиального трассирования [8].

Основные положения этого метода следующие:

Задаются:

1) упорядоченное множество контрольных точек

$$G = \{G_{il} | i = 1, 2, \dots, l\},$$

где $G_i = (x_i, y_i, w_i, t_i, u_i)$;

x_i, y_i – координаты i -й контрольной точки;

w_i – вес i -й точки, для которой $\frac{d}{w_i}$ является максимально допустимым отклонением

ем данной точки от трассы (d – задаваемая константа);

ti – направление касательной в i -й точке;

wi – весовая характеристика для возможности фиксации направления касательной;

2) d – константа, в совокупности с wi устанавливающая допустимое отклонение i -й точки от трассы;

3) r_{min} – минимально допустимый радиус;

4) Y_0^{min}, Y_0^{max} – первая и вторая производные в начальной точке полинома.

Новое множество точек Q определяется следующим образом: k – произвольное число новых точек, отстоящих друг от друга на равном расстоянии, по прямой, соединяющей точки Gi и $Gi + 1$,

$$L = l + (l - 1)k,$$

$$I = \{i + (i - 1)kli = 1, 2, \dots, L\},$$

$$Q = \{Qilj = 1, 2, \dots, L\},$$

$$Qj = (Xj, Yj, Wj, Tj, Uj). \quad (1)$$

Трасса на участке данного множества представляется в виде полинома:

$$y = y'_0 x + \frac{1}{2} y''_0 x^2 + a_3 x^3 + a_4 x^4 + \dots a_n x^n. \quad (2)$$

Степень полинома n и его коэффициенты $a_3, a_4, \dots, a_n$ принимаются такими, чтобы трасса удовлетворяла следующим условиям:

а) отклонение от трассы для каждой точки Gi должно быть меньше допустимого:

$$\frac{|y(xi) - (yi)|}{\sqrt{1 + y'^2(xi)}} \leq \frac{d}{wi}; \quad (3)$$

б) радиус в каждой точке Qj должен быть не меньше допустимого:

$$|rj| = rmin, \\ rj = \frac{[1 + y'^2(Xj)]^{3/2}}{y''(Xj)}; \quad (4)$$

в) должно быть минимально выражение

$$\sigma = \sum_{j=1}^L \{Wi[Yi - y(Xj)]^2 + \\ + Ui[Tj - y'(Xj)]^2 + \lambda g[y''(Xj)]^2\}, \quad (5)$$

где g – функция веса;

λ – переменная, принимаемая из условия минимизации – n (степень полинома);

k, W, U и g – были определены автором при помощи экспериментов, а λ – определяется программным путем.

Характеристики $n, a_3, a_4, \dots, a_n$ определяются следующим образом: для различных значений λ и для возрастающих значений n решается система линейных уравнений:

$$\frac{\delta \sigma}{\delta a_m} = 0, m = 3, 4, \dots, n, \quad (6)$$

до тех пор, пока не будет получено удовлетворительное решение.

В методе В. Калогеро [8] предусмотрена возможность задания промежуточных и конечных точек, для которых:

а) фиксированы координаты xi, yi (путем задания максимально большого веса точки, то есть wi);

б) фиксировано направление касательной к трассе ti (путем введения максимально большого значения ui);

в) фиксирована величина радиуса.

Анализ метода полиномиального трассирования:

1. Величина изменения центростремительного ускорения не контролируется данным методом. Используя метод полиномиального трассирования в изложенной выше постановке, трудно вносить коррективы в полученные проектные решения.

2. Если наносить контрольные точки трассы, руководствуясь главным образом экономическими соображениями и не прорабатывать ее графически, то трасса может получиться излишне извилистой, что является недопустимым.

3. При использовании полиномиального трассирования осложняется вынос трассы на местность.

Выводы

Подводя итог, можно сделать вывод, что для окончательного трассирования применение на этапе предварительной проработки трассы лесовозной автомобильной дороги методов сглаживания, с использованием полиномов или для получения приближения при последующей аппроксимации трассы круговыми кривыми, клотоидами и прямыми, в полной мере нельзя применять.

Список литературы

1. Иванов В.Н., Ерохов В.Н. Влияние параметров автомобильных дорог на расход топлива // Автомобильные дороги. 2014. № 8. С. 10–13.
2. Dorokhin S.V., Chernyshova E.V. Mathematical Model of Statistical Identification of Car Transport Information Provision. J. Engineering and Applied Sciences. 2017. V. 12. No. 2. P. 511–515.
3. Чернышова Е.В. Алгоритм решения задачи оптимального трассирования лесовозной автомобильной дороги на неоднородной местности // Вестник ВГУИТ. 2017. Т. 79. № 2 (72). С. 113–120.

4. Чернышова Е.В. Методы формирования цифровой модели местности при трассировании лесовозных автомобильных дорог // Системы. Методы. Технологии. 2017. № 3 (35). С. 143–148.

5. Чернышова Е.В., Чирков Е.В., Поставничий С.А., Могутнов Р.В. Теоретические основы и методы математического моделирования лесовозных автомобильных дорог // ИВУЗ Лесной журнал. 2018. № 6 (366). С. 117–127.

6. Кондрашова Е.В., Скворцова Т.В. Совершенствование организации дорожного движения в транспортных системах лесного комплекса // Системы управления и информационные технологии. 2008. № 3.2 (33). С. 272–275.

7. Zavrzhnov A.I., Belyaev A.N., Zelikov V.A., Tikhomirov P.V., Mikheev N.V. Designing mathematical models of geometric and technical parameters for modern road-building machines versus the main parameter of the system. Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology Proceedings of the International Symposium «Engineering and Earth Scienc-

es: Applied and Fundamental Research» dedicated to the 85-th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019). 2019. P. 823–827.

8. Berestnev O., Soliterman Y., Goman A. Development of Scientific Bases of Forecasting and Reliability Increase of Mechanisms and Machines – One of the Key Problems of Engineering Science. International Symposium on History of Machines and Mechanisms Proceedings. 2000. P. 325–332.

9. Козлов В.Г., Скрыпников А.В., Микова Е.Ю., Могутнов Р.В., Чирков Е.В. Формирование модели проектирования системы «дорожные условия – транспортные потоки» и пути ее реализации // Лесинженерное дело. 2018. Т. 8. № 1 (29). С. 100–111. DOI: 10.12737/article_5ab0dfbe6e6ce23.91630316.

10. Kozlov V.G., Gulevskiy V.A., Skrypnikov A.V., Logoyda V.S., Menzhulova A.S. Method of Individual Forecasting of Technical State of Logging Machines. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. V. 327(4). P. 042–056. DOI: 10.1088/1757-899X/327/4/042056.