

УДК 004.94: 631.37

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕУСТАНОВИВШЕГОСЯ ДВИЖЕНИЯ ЛЕСОВОЗНОГО АВТОПОЕЗДА С УЧЕТОМ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПЕРЕКЛЮЧЕНИИ ПЕРЕДАЧ

Шегельман И.Р., Скрыпник В.И., Кузнецов А.В., Васильев А.С.

*ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет»,
Петрозаводск, e-mail: kuzalex@psu.karelia.ru*

Широко применяемые в настоящее время методики тяговых расчетов при моделировании движения автопоездов не учитывают в полной мере переходные процессы, происходящие в момент переключения передач. В работе представлены математические зависимости, позволяющие определить при проведении расчетов оптимальный момент переключения передачи с n -й на $(n - 1)$ с целью начала движения на $(n - 1)$ передаче с максимально допустимой скорости на низшей передаче и для получения наибольшей интенсивности разгона и минимизации времени движения на участке при переходе с n -ной на $(n + 1)$ передачу. Разработанная методика расчетов с учетом особенностей переходных режимов, происходящих при переключении передач, позволяет уточнить расчет показателей движения лесовозных автопоездов на вертикальных кривых и прямолинейных в профиле участках, а также дает возможность при моделировании движения избегать проведения большого количества итеративных расчетов.

Ключевые слова: моделирование движения, лесовозные автопоезда, неустойчивое движение, переключение передач

LOGGING TRUCK UNSTABLE MOTION SIMULATION BY TAKING INTO ACCOUNT TRANSITION PROCESSES OF GEAR SHIFT

Shegelman I.R., Skrypnik V.I., Kuznetsov A.V., Vasilev A.S.

*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Petrozavodsk State University»,
Petrozavodsk, e-mail: kuzalex@psu.karelia.ru*

Widely used now methods of speed-time-distance calculation for logging truck motion simulation do not fully take into account transition processes at the moment of gear shift. The article provides mathematical relations allowing to define during the calculations the optimal moment of gear shift from n to $(n - 1)$ for the purpose of motion start in $(n - 1)$ gear from the maximum allowable speed in low gear and for the highest acceleration amount and minimization of motion time at a section during gear shift from n to $(n + 1)$ gear. The developed calculation method takes into account the peculiarities of transition modes during gear shift. It allows to specify the calculation of logging truck motion indicators at vertical curves and straight-line portions. It also gives an opportunity to avoid a lot of iterative computations during motion simulation.

Keywords: motion simulation, logging trucks, unstable motion, gear shift

В настоящее время для проведения тяговых расчетов применяются две основные группы способов: приближенные (на основе метода равновесных скоростей) и точные (в основе которых лежит более эффективная методика расчета).

Метод тяговых расчетов, основанный на принципе равновесных скоростей, как общеизвестно, заключается в том, что движение на каждом элементе продольного профиля считается установившимся и расчет скорости ведется из условия равенства нулю равнодействующих внешних сил; так как на практике установившееся движение почти не имеет места, это облегчает расчеты, но делает их неточными.

При проведении расчетов с использованием этого метода не учитывается неустойчивое движение лесовозного автопоезда (неполное использование мощности, движение накатом, торможение двигателем, моторным тормозом и колесными тормоза-

ми), в том числе изменение сопротивления движению на вертикальных кривых, динамика тягового и тормозного усилия при разгоне и торможении и т.д. [1, 2, 5–8, 10].

Точными [4] называются методы тяговых расчетов, которые позволяют производить расчет параметров движения лесовозного автопоезда (скорости и времени) с учетом неустойчивого его движения. Как правило, в основе этих методов лежат графические, графоаналитические и аналитические способы интегрирования уравнения движения. Графики скорости, полученные с помощью этих методов, характеризуются плавной кривой. При этом, несмотря на свое название, не все эти методы обеспечивают необходимую точность расчета для решения актуальных инженерных задач на автотранспорте.

На кафедре «Технологии и организации лесного комплекса» ПетрГУ разработаны методика, алгоритм и программа моделирования

движения лесовозных автопоездов [1, 2, 5–8, 10], которые дают возможность определить скорость, время движения и расход топлива автопоезда с учетом всех основных факторов, влияющих на показатели движения при его неустановившемся движении по дорогам различных категорий.

При расчете скорости и времени движения с помощью традиционно применяемых на лесотранспорте методов, в том числе основанных на принципе равновесных скоростей, изменением скорости движения в процессе переключения передач, как правило, пренебрегают, что приводит к значительным погрешностям в определении показателей движения [3, 4].

Для получения наибольшей интенсивности разгона и минимизации времени движения на участке при переходе с n -й на $(n + 1)$ передачу наиболее целесообразно начинать переключение при достижении максимально допустимой скорости на низшей передаче. При переходе с n -й на $(n - 1)$ передачу оптимальным является переключение с такой скорости на высшей передаче, при которой после переключения движение на низшей передаче начинается с максимально допустимой скорости.

В первом случае для определения скорости (v_k) при движении на вертикальных кривых, с которой начинается движение автопоезда, после переключения передач используется уравнение [9]

$$v_k = \frac{Tgt}{G\delta} + \frac{t^2vg}{2R} + v_n, \quad (1)$$

где $T = A - B \cdot v^2$; $A = a - G \cdot \omega \pm G \cdot i$; $B = b + k_b \cdot \Delta \cdot \Omega \cdot v^2$; v_n – скорость, с которой начинается переключение передач, м/с; t – время переключения передач, с; G – вес автопоезда, кгс; a и b – коэффициенты зависимости, аппроксимирующей тяговую или тормозную характеристику автопоезда в виде $F = a - b \cdot v^2$; ω – коэффициент сопротивления качению; δ – коэффициент учета инерции вращающихся масс; k_b – коэффициент сопротивления воздушной среды автомобиля; Δ – коэффициент, учитывающий дополнительное сопротивление от прицепов; Ω – лобовая площадь автомобиля, м²; R – радиус вертикальной кривой, м; i – продольный уклон; g – ускорение свободного падения, м/с²; v – скорость неустановившегося движения автопоезда, м/с.

Во втором случае для определения скорости движения на вертикальных кривых (v_n), с которой следует начинать переключение передач, используется зависимость [9]

$$v_n = -\frac{Tgt}{G\delta} - \frac{t^2vg}{2R} + v_k. \quad (2)$$

Для определения тех же показателей при движении автопоезда на прямолинейных в профиле участках используются зависимости [9]

$$v_k = \frac{Tgt}{G\delta} + v_n; \quad (3)$$

$$v_n = -\frac{Tgt}{G\delta} + v_k. \quad (4)$$

Зависимости (1) и (2) для определения v_k и v_n на вертикальных кривых применимы для расчетов, когда в точке перехода к режиму движения накатом известны показатели, характеризующие дорогу: сопротивление движению, зависящее от уклона, радиуса вертикальной кривой и расстояния, пройденного на ней автопоездом.

Если определять эти показатели при моделировании движения на персональном компьютере, то для получения результатов с достаточной точностью через короткие интервалы пути (5–10 м) приходится проводить большое количество итеративных вычислений [4].

Для определения скорости неустановившегося движения лесовозного автопоезда на вертикальных кривых используется зависимость [5]

$$v = \sqrt{\frac{2TS + kS^2}{Z} + v_0^2}, \quad (5)$$

где $Z = \frac{G \cdot \delta}{g}$; $k = \frac{G}{R}$; v_0 – начальное значение скорости до начала переключения передач, м/с; S – расстояние, пройденное автопоездом, при изменении скорости от v_0 до v , м.

При снижении скорости на участке и при переключении с высшей передачи на низшую скорость, определяемая по формуле (5), должна быть равна скорости, с которой необходимо начинать переключение передач, с тем, чтобы движение на передаче начиналось с максимальной скоростью:

$$v = \sqrt{\frac{2TS + kS^2}{Z} + v_0^2} = \frac{T'gt}{G\delta} - \frac{Sgt}{R\delta} + \frac{t^2vg}{2R\delta} + v_k, \quad (6)$$

где $T = T' - a$.

Обозначив

$$\left(\frac{T'gt}{G\delta} + \frac{t^2vg}{2R\delta} + v_k \right) = \rho,$$

получим

$$\frac{2TSg}{G\delta} + \frac{S^2g}{R\delta} + v_0^2 = \left(-\frac{Sgt}{R\delta} + \rho \right)^2,$$

тогда

$$\frac{2TSg}{G\delta} + \frac{S^2g}{R\delta} + v_0^2 = \left(\frac{S^2g^2t^2}{R^2\delta} - 2\frac{Sgt}{R\delta}\rho + \rho^2 \right);$$

$$\frac{S^2g}{R\delta} - \frac{S^2g^2t^2}{R^2\delta^2} + \frac{2TSg}{G\delta} + \frac{2Sgt}{R\delta}\rho + v_0^2 - \rho^2 = 0.$$

Обозначив

$$\begin{aligned} \frac{g}{R\delta} - \frac{g^2t^2}{R^2\delta^2} &= a'; \\ \frac{2Tg}{G\delta} + \frac{2gt}{R\delta}\rho &= b'; \quad v_0^2 - \rho^2 = c'. \end{aligned}$$

Получаем квадратное уравнение относительно S , то есть расстояние, начиная с которого, следует начинать переключение передач, решая которое, находим

$$S = \frac{\pm\sqrt{4b'^2 - 4a'c'} - b'}{2a'}. \quad (7)$$

Пример. Автопоезд МАЗ-6303-26 + МАЗ-83781 начал движение на вертикальной вогнутой кривой радиусом 2000 м на 8 передаче с начальной скоростью 20 м/с; продольный уклон участка – 0,004; $\omega = 0,02$; $a = 1047,8$, $b = 0,972$, $G = 48000$ кг [2].

$$T = 1047,8 - 48000(0,020 - 0,004) - 20^2 \cdot 0,972 = -109;$$

$$T' = 48000(0,020 - 0,004) - 20^2 \cdot 0,972 = -968;$$

$$\rho = \frac{968 \cdot 9,81 \cdot 1,5}{48000 \cdot 1,02} + \frac{1,5^2 \cdot 14,79 \cdot 9,81}{2 \cdot 2000 \cdot 1,02} + 14,79 = 15,16,$$

в уравнении (7)

$$a' = \frac{9,81}{-2000 \cdot 1,048} - \frac{1,5^2 \cdot 9,81^2}{2000^2 \cdot 1,048^2} = -0,0475;$$

$$b' = -\frac{2(-109) \cdot 9,81}{48000 \cdot 1,048} + \frac{2 \cdot 9,81}{(-2000) \cdot 1,02} \cdot 15,16 = 0,104;$$

$$c' = -229,83 + 400 = -170,17 = 168,35;$$

$$S = \frac{0,104 \pm \sqrt{(2 \cdot 0,104) - 4(-0,00485) \cdot 171,17}}{2 \cdot (-0,00485)} = 174,5 \text{ м};$$

$$v = \sqrt{\frac{-2 \cdot 174,5 \cdot 109 + 24 \cdot 174,5^2}{5127}} = \sqrt{135,1 + 400} = 16,3 \text{ м/с}.$$

На прямолинейных в профиле участках продольный уклон на всем его протяжении не меняется. Следовательно, для определения скорости движения, с которой следует начинать переключение с n -й на $(n - 1)$ передачу, следует использовать формулу (4).

Пример. Автопоезд МАЗ-6303-26 + МАЗ-83781 начал движение на прямолинейном в профиле участке с уклоном 0,015; $\omega = 0,025$ на 8 передаче со скоростью 19 м/с. Определить скорость движения, с которой целесообразно производить переключение с восьмой передачи на седьмую, и расстояние до этой точки.

$$T = 1047,8 - 48000 \cdot (0,015 + 0,025) - 0,972 \cdot 19^2 = -1462,2;$$

$$T' = -48000 \cdot (0,015 + 0,025) - 0,6 - 14,79^2 = -1920 - 131,2 = -2051;$$

$$v = \frac{-2051 \cdot 1,52 \cdot 9,81}{-48000 \cdot 1,62} + 14,79 = 15,406 \text{ м/с}.$$

Расстояние

$$S = \frac{(15,406^2 - 19^2) \cdot 48000 \cdot 1,048}{2 \cdot 9,81 \cdot (-1462,2)} = 216,62 \text{ м}.$$

Проверяем решение по формуле (5).

$$v = \sqrt{\frac{-216,62 \cdot 1462,2}{5128} \cdot 2 + 19^2} = \sqrt{-123,5 + 361} = \sqrt{237,46} = 15,4 \text{ м/с}.$$

Имеем практически полное совпадение в результате расчетов по обеим формулам.

При разгоне автопоезда переключение передач с низшей на высшую целесообразно производить при достижении максимальной допустимой скорости на n -й передаче. В этом случае обеспечивается максимальная интенсивность разгона и минимальное время движения на участке.

Так как максимально допустимая скорость движения на каждой передаче известна (определяется по технической характеристике автопоезда), то наиболее рационально определить расстояние, на котором будет производиться разгон автопоезда по следующей формуле [6, 10]:

$$S = \frac{\pm \sqrt{4T^2 - 4kZ(v_0^2 - v_k^2)} - 2T}{2k}, \quad (8)$$

где v_0 – начальная скорость движения на участке, м/с; v_k – скорость в конце участка S , равная v_{\max} для n -ной передачи, м/с.

Так как в диапазоне $v_0 - v_k$ величина T изменяется, её можно принять средней или среднеинтегральной в указанном диапазоне.

После определения S находится уклон в точке начала переключения передач:

$$i = i_0 \pm \frac{S}{R}, \quad (9)$$

$$S = \frac{2 \cdot 906,27 \pm \sqrt{(2 \cdot 906,8)^2 - 4 \cdot 24(10^2 - 14,79^2) \cdot 5250}}{48} = 127,4 \text{ м.}$$

При движении накатом при переключении передач для расчетов используется формула (1):

$$T'_n = -48000(0,02 + 0,01) - 14,79^2 \cdot 0,6 + \frac{48000 \cdot 127,8}{2000} = 3061;$$

$$v_k = \frac{3061 \cdot 9081 \cdot 1,5}{48000 \cdot 1,028} + \frac{1,5^2 \cdot 14,79 \cdot 9,81}{2 \cdot 2000} + 14,79 = 16,39 \text{ м/с.}$$

При движении на прямолинейном в профиле участке решение этой задачи упрощается, расстояние до точки переключения передач определяется по формуле:

$$S = \frac{(v^2 - v_0^2)Z}{2T} = \frac{(v^2 - v_0^2)G\delta}{2Tg}. \quad (11)$$

Скорость после переключения передач:

$$v_k = \frac{T'gt}{G\delta} + v_n. \quad (12)$$

Пример. Автопоезд МА3-6363-26 + МА3-83781 начал движение на прямолинейном в профиле участке с уклоном $-0,040$, с начальной скоростью 10 м/с на 7 передаче. $\omega = 0,02$; определить расстояние до точки начала переключения с 7 на 8 передачу и скорость, с которой начнется движение на 8 передаче.

$$T = -48000(-0,040 + 0,020) - 1,41 \cdot 10^2 = 2299.$$

где i_0 – начальное значение продольного уклона.

Затем определяется величина тягового (F) или тормозного усилия T' в момент начала движения накатом:

$$F = T' - \frac{GS}{R} = -Bv^2 - G(\omega \pm i) - \frac{GS}{R}. \quad (10)$$

После этого по формуле (1) определяется начальная скорость движения на $(n + 1)$ передаче.

Пример. Автопоезд МА3-6303-26 + МА3-83781 начал движение на 7 передаче на вертикальной выпуклой кривой радиусом 2000 м с начальной скоростью 10 м/с. $i = -0,01$; $\omega = 0,02$; $G = 48000$ кг; $a = 1480,7$; $b = 1,41$. Максимальная скорость движения на седьмой передаче $14,79$ м/с. Определить расстояние, которое пройдет автопоезд до точки начала переключения передач, и скорость, с которой начнется движение на 8 передаче.

$$A = 1480,7 - 48000(0,02 - 0,01) = 1047,8;$$

$$T = a - Bv_0^2 = 1047,8 - 1,41 \cdot 10^2 = 906,8.$$

Расстояние до точки переключения передач определяем по формуле (8):

По формуле (11) определяем

$$S = \frac{(14,79^2 - 10^2) \cdot 48000 \cdot 1,048}{2 \cdot 2299 \cdot 9,81} = 132,43 \text{ м};$$

$$T' = 48000(-0,040 + 0,020) - 14,79^2 \cdot 0,6 = 828;$$

$$v_k = \frac{828 \cdot 9,81 \cdot 1,5}{48000 \cdot 1,02} + 14,79 = 15,04 \text{ м/с}.$$

Разработанная методика расчетов скорости движения в переходном режиме при переключении передач с использованием полученных расчетных формул в сочетании с выведенными ранее зависимостями и разработанными алгоритмами для определения показателей движения в других переходных режимах [1] (например, при переходе от разгона к торможению при подходе к участкам ограничения скорости и движения на них и расчета скорости при торможении двигателем, моторным тормозом и т.д.) позволяет уточнить расчет показателей движения лесовозных автопоездов на вертикальных кривых и прямолинейных в профиле участках, а также дает возможность при моделировании движения избежать проведения большого количества итеративных расчетов.

Список литературы

1. Аналитические зависимости для определения рационального режима снижения скорости лесовозного автопоезда при дорожных ограничениях / И.Р. Шегельман, В.И. Скрыпник, А.В. Кузнецов, А.С. Лещевич // Инженерный вестник Дона: электронный научный журнал. – 2014. – № 4. – URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2014/2577> (дата обращения 24.03.2016).
2. Вывозка леса автопоездами. Техника. Технология. Организация / И.Р. Шегельман, В.И. Скрыпник, А.В. Кузнецов, А.В. Пладов. – СПб.: ПРОФИКС, 2008. – 304 с.
3. Ильин Б.А. Тягово-эксплуатационные расчеты при проектировании лесовозных дорог. – Л.: ЛТА, 1986. – С. 70.
4. Сухопутный транспорт леса / В.И. Алябьев, Б.А. Ильин, Б.И. Кувалдин, Г.Ф. Грехов. – М.: Лес. пром-ть, 1990. – 416 с.
5. Скрыпник В.И. Вывод зависимостей для проведения тяговых расчетов и моделирования движения лесовозных автопоездов / В.И. Скрыпник, А.В. Кузнецов, В.Н. Баклагин // Актуальные проблемы развития лесного комплекса: материалы междунар. науч.-техн. конф. – Вологда, 2010. – С. 198–202.
6. Скрыпник В.И. Анализ и расчет параметров движения лесовозных автопоездов / В.И. Скрыпник, А.В. Кузнецов, В.Н. Баклагин // Труды лесоинженерного факультета ПетрГУ. – Петрозаводск: ПетрГУ, 2010. – Вып. 8. – С. 140–144.
7. Скрыпник В.И. Определение параметров неустановившегося движения лесовозных автопоездов / В.И. Скрыпник, А.В. Кузнецов // Механика технологических процессов в лесном комплексе: материалы междунар. науч.-техн. конф. – Воронеж, 2014. – С. 357–361.
8. Скрыпник В.И. Определение оптимальных режимов движения лесовозных автопоездов при наличии участков ограничения скорости / В.И. Скрыпник, А.В. Кузнецов // Современные проблемы анализа динамических систем. Приложения в технике и технологиях: материалы междунар. науч.-практ. конф. – Воронеж, 2014. – С. 243–247.
9. Шегельман И.Р. Теоретический подход к описанию процесса движения лесовозных автопоездов на подходе к участкам, имеющим ограничения скорости, и при переключении передач / И.Р. Шегельман, В.И. Скрыпник, А.В. Кузнецов // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1. – URL: <http://science-education.ru/121-18923> (дата обращения: 24.03.2016).
10. Шегельман И.Р. Функционально-технологический анализ параметров движения лесовозных автопоездов / И.Р. Шегельман, В.И. Скрыпник, А.В. Кузнецов // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 8–4. – С. 833–836.