

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА МАРШРУТА ДВИЖЕНИЯ КОЛЕСНЫХ МАШИН

Представлена математическая модель расчета маршрута движения колесных машин.

Ключевые слова: маршрут, участок дороги, дорожные условия, эффективность использования колесных машин.

Эффективность использования колесных машин в значительной степени зависит от условий их эксплуатации. Очевидно, что эффективность движения в различных районах страны или даже на различных маршрутах внутри одного района будут различаться. Определение эффективности движения на каком-либо конкретном маршруте, не являющемся представительным, неприемлемо, поскольку возникает вопрос о движении по другим маршрутам с другими дорожными условиями. Поэтому для оценки эффективности использования колесных машин необходимо учитывать большое количество различных сочетаний дорожных условий, характерных для нескольких районов. Такой подход реализован с помощью учета статистических характеристик представленного маршрута в зависимости от географического района.

Участки маршрута образуются случайным наложением следующих групп параметров: уклонов, поворотов и типов поверхностей дорог. На характеристики маршрута действуют ограничения по нормам СНИП.

По разработанной классификации [1] данные маршрута делятся на три уровня. На первом уровне определены удельные содержания типов дорог в местностях выбранного района (равнинной, умеренно-холмистой, холмистой, сильнопересеченной), а также определены удельные содержания твердых и грунтовых поверхностей дорог. Ко второму уровню относятся статистические характеристики, определяющие вероятности проявления различных значений параметров на маршруте (типов дорог, подъемов, спусков, кривизны в плане). Третий уровень включает параметры маршрута, непосредственно воздействующие на модель движения шасси: продольный уклон участка дороги α , кривизна в плане k и номер типа поверхности дороги N_{mn} для каждого участка дороги. Под участком здесь понимается отрезок дороги с постоянными или малоизменяющимися (менее 5 %) указанными выше параметрами.

Участки разделены на группы, первые четыре из которых описывают дорожные условия на поверхностях с твердыми покрытиями в четырех местностях, вторые четыре — на грунтовых поверхностях. Дополнительными данными являются значения коэффициента сопротивления качению f , коэффициента сцепления ϕ , параметров грунта s и μ , а также реализации микропрофилей дорог.

Маршрут обладает статистическим (вероятностным) характером. Поэтому необходимо выполнение требований по обеспечению его представительности:

должны быть достаточно большими для статистической оценки длины всех реализаций уклонов, кривизны в плане и типов дорожных поверхностей. Это требование определяет последовательность перехода от одного из перечисленных уровней данных маршрута к другому. Вначале осуществляется наиболее трудоемкий переход от второго к третьему уровню по статистическим характеристикам дорог в четырех местностях рассчитываются реализации уклонов, кривизны в плане и типов дорожных поверхностей. Таким образом, при переходе от второго к третьему уровню данных для любых маршрутов гарантированно обеспечивается необходимая для статистических расчетов продолжительность реализаций. Типовой маршрут представляет собой совокупность указанных реализаций, взят с учетом удельных весов, определяемых параметрами первого уровня (географический район, удельные содержания дорог в местностях, удельные содержания твердых и грунтовых поверхностей дорог).

Последовательность моделирования представительного маршрута движения состоит в формировании реализаций продольных уклонов по классификации МАДИ, кривизны маршрута в плане и чередования типов дорожных поверхностей в различных местностях. Далее реализации α , N_{mn} объединяются. Целью объединения является получение данных по маршруту, содержащих одновременно параметры α , k и N_{mn} для каждого участка. Дополнительно для каждого типа дорожной поверхности формируются реализации микропрофилей и указываются коэффициенты f , ϕ , s и μ .

Объединенные и подразделенные на участки реализации, совместно с дополнительными данными, описывают дорожные условия и являются возмущениями для математической модели движения.

Продольные уклоны дорог рассчитываются по спектральным плотностям высот макропрофиля дорог, приведенным в [1]. По спектральным плотностям высот макропрофилей с помощью преобразования Фурье для равнинной, среднепересеченной, холмистой и сильнопересеченной местностей находятся соответствующие реализации высот макропрофилей, которые затем пересчитываются в продольные уклоны дорог.

Спектральные плотности высот макропрофиля дорог $K(\lambda)_i$ для i местности определяются зависимостями:

$$K(\lambda)_i = \frac{D_{ii}}{\lambda_i^2},$$

если $\lambda_i < \lambda_{ri}$ (зона средних неровностей);

$$K(\lambda)_i = \frac{D_{2i}}{\lambda_i^4},$$

если $\lambda_i > \lambda_{ri}$ (зона коротких неровностей):

$$D_{2i} = K(\lambda_{ri}) \cdot \lambda_i^2, \quad (1)$$

где λ_{ri} — путевая частота границы зон средних и коротких неровностей;

D_{1i}, D_{2i} — коэффициенты спектральных плотностей; λ_i — текущая путевая частота высот макропрофиля.

Количество точек спектральной плотности:

$$K\lambda = 2^{Is+i}, \quad (2)$$

где I_s — окно спектра.

Минимальная круговая частота макропрофиля:

$$\lambda_{\mu v} = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda_{\mu \alpha \xi}}, \quad (3)$$

где I_{max} — максимальная длина волны макропрофиля.

Шаг круговой путевой частоты макропрофиля:

$$h\lambda_i = \frac{\lambda_{max i} - \lambda_{min}}{K\lambda - 1}, \quad (4)$$

где $\lambda_{max i}$ — максимальная круговая частота макропрофиля в i -й местности.

Количество точек высот макропрофиля по длине реализации:

$$K_e = \frac{l}{h_e}, \quad (5)$$

где h_e — шаг по длине реализации макропрофиля:

$$h_e = \frac{1}{\left(\frac{h\lambda}{2 \cdot \pi}\right) \cdot 2^{Is}}. \quad (6)$$

Реализация высот макропрофиля в соответствии с преобразованием Фурье:

$$Z_{ki} = \sum \sqrt{2 \cdot K(\lambda_j)_i \cdot h\lambda_i} \cdot \cos \cdot ((\lambda_{min} + (j-1) \cdot h\lambda_i) \cdot K \cdot h_e + \varphi(j)), \quad (7)$$

где i — номер местности;

j — номер точки путевой частоты спектральной плотности;

K — номер точки высоты макропрофиля в реализации по длине;

$\varphi(j)$ — фаза, выбранная случайно в диапазоне значений от $-\pi$ до π .

Продольные уклоны дорог вычисляются по формуле:

$$\alpha_y = \frac{Z_{k+1} - Z_k}{h_e}. \quad (8)$$

Исходными данными для расчета кривизны дорог в каждой местности являются распределения вероятностей появления на маршруте радиусов углов и направлений поворотов, имеющих определенные значения. Все значения этих параметров разделены на интервалы [2].

Количество радиусов K_{RL} , углов поворотов K_{QL} и направлений поворотов K_{NPL} , значения которых находятся в L -том интервале, определяются зависимостями (фигурными скобками обозначена операция нахождения целой части):

$$K_{RL} = \{P_R(L) \cdot K_{PM}\}, \quad (9)$$

$$K_{QL} = \{P_Q(L) \cdot K_{PM}\}, \quad (10)$$

$$K_{NPL} = \{P_{NP}(L) \cdot K_{PM}\}, \quad (11)$$

где $P_R(L)$, $P_Q(L)$, $P_{NP}(L)$ — вероятности появления радиусов, углов и направлений поворотов в L -том интервале их значений;

K_{PM} — количество поворотов на маршруте.

$$K_{PM} = K_{\Pi} \cdot L_{mi}, \quad (12)$$

где K_{Π} — количество поворотов на километре маршрута;

L_{mi} — длина маршрута в i -той местности.

Для формирования реализаций радиусов, углов поворотов и направлений поворотов применяется генератор случайных равномерно распределенных чисел ψ в интервале от 0 до 1 и цифровой фильтр для получения данных распределений указанных параметров.

По текущему значению ψ определяется номер интервала L значений параметров. При расчете интегральных плотностей вероятностей радиусов R , углов поворотов Q и направлений поворотов NP , выражающихся зависимостями:

$$F_R(n) = \sum_n P_R(n), \quad (13)$$

$$F_Q(n) = \sum_n P_Q(n), \quad (14)$$

$$F_{NP}(n) = \sum_n P_{NP}(n) \quad (15)$$

по выполнению условия $F_R(n) > \psi$, $F_Q(n) > \psi$, $F_{NP}(n) > \psi$ принимается $L=n$.

Длины прямых участков (вставок) между поворотами:

$$L_{np} = \frac{L_m - \sum \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot R(j)}{360} \cdot Q(j) \right)}{K_{nm}}, \quad (16)$$

где $R(j)$, $Q(j)$ — радиус и угол j -го поворота;

L_m — длина маршрута.

Типы покрытий, учитываемые в представительном маршруте:

1 и 2 — цементобетонное шоссе удовлетворительного состояния и изношенное;

3 и 4 — булыжное шоссе удовлетворительного состояния и изношенное;

5 и 6 — гравийно-щебеночная дорога удовлетворительного состояния и разбитая;

7 и 8 — грунтовая дорога удовлетворительного состояния и разбитая;

9 — бездорожье (местность).

Распределение типов покрытий по маршруту равномерное, получаемое с помощью алгоритма по формуле при $P_R(j) = 1/K_{nm}$ для твердых поверхностей дорог и при $P_R = 1/K_{nr}$ грунтовых поверхностей, где K_{nm} и K_{nr} — количество типов твердых и грунтовых поверхностей. Поверхности 1–4 отнесены к твердым поверхностям дорог, 5–9 — к грунтовым поверхностям. Чередование типов дорожных поверхностей принято равновероятным.

Длины отрезков дорог с различными типами поверхностей имеют равномерное распределение вероятностей появления в интервале от 100 до 1000 метров.

Микропрофили дорог рассчитываются в виде реализаций для каждого из принятых типов поверхностей по спектральным плотностям высот микропрофилей [2]. Спектральные плотности $S(\lambda_i)$ в зависимости от путевой частоты λ_i выражаются формулой:

$$S(\lambda_i) = A \cdot \lambda_i^W, \quad (17)$$

где A и W — постоянные параметры, задаваемые для каждого типа дорожной поверхности.

Количество точек спектральной плотности:

$$K\lambda = 2^{Is+i}, \quad (18)$$

где I_s — окно спектра.

Граничные значения круговых путевых частот спектра:

$$\lambda_{max} = \lambda_{min} + \Delta\lambda, \quad (19)$$

где $\Delta\lambda$ — ширина спектра.

Шаг круговой путевой частоты:

$$h\lambda_i = \frac{\lambda_{max} - \lambda_{min}}{K\lambda - 1}, \quad (20)$$

где λ_{max} — максимальная круговая частота макропрофиля в i -й местности.

Шаг реализации по длине дороги:

$$h_L = \frac{2 \cdot \pi}{2^{is} \cdot h\lambda}. \quad (21)$$

Количество точек реализации по длине дороги:

$$K_L = \frac{L_M}{h_L}. \quad (22)$$

Для расчета реализаций по правой и левой колеям дорог используется коэффициент корреляции параллельных сечений микропрофиля $\rho(\lambda)$:

$$\rho(\lambda) = \frac{1}{1 + \left(\frac{B \cdot \lambda_i}{n} \right)^2}, \quad (23)$$

где B — колея шасси;

n — коэффициент дороги.

С помощью коэффициента корреляции рассчитываются спектральные плотности полусуммы $S_{z1}(\lambda_i)$ и полуразности $S_{\psi 1}(\lambda_i)$ микропрофилей колеи:

$$S_{z1}(\lambda_i) = S(\lambda_i) \cdot (1 + \rho(\lambda_i)), \quad (24)$$

$$S_{\psi 1}(\lambda_i) = S(\lambda_i) \cdot (1 - \rho(\lambda_i)). \quad (25)$$

По указанным спектральным плотностям получаются (с помощью преобразования Фурье) реализации значений полусуммы Z_j и полуразности ψ_j микропрофилей колеи:

$$Z_j = \sum_i \sqrt{2 \cdot S_{z1}(\lambda_i) \cdot h\lambda} \cdot \cos((i \cdot h\lambda) \cdot j \cdot h_L + \psi_1(i)), \quad (26)$$

$$\psi_j = \sum_i \sqrt{2 \cdot S_{\psi 1}(\lambda_i) \cdot h\lambda} \cdot \cos((i \cdot h\lambda) \cdot j \cdot h_L + \psi_1(i)), \quad (27)$$

где i, j — порядковые номера точек путевой частоты и точек реализаций по длине;

$\psi_1(i), \psi_2(i)$ — фазы гармонических составляющих реализаций, выбранные помощью генератора случайных чисел в интервале от $-\pi$ до π .

Реализации высот микропрофилей по правой (Z_{nj}) и левой ($Z_{\lambda j}$) колеям:

$$Z_{nj} = (Z_j - M_z) - (\psi_j - M_\psi), \quad (28)$$

$$Z_{\lambda j} = (Z_j - M_z) + (\psi_j - M_\psi), \quad (29)$$

где M_z, M_ψ — математические ожидания реализаций полусуммы и полуразности микропрофилей колеи.

$$M_z = \frac{\sum_j Z_j}{K_L}, \quad (30)$$

$$M_\psi = \frac{\sum_j \psi_j}{K_L}. \quad (31)$$

Формирование маршрута проведено для Западного географического района. Удельное содержание дорог в местностях этого географического района:

в равнинной местности — 0,49;

в умереннохолмистой — 0,28;

в холмистой — 0,08;

в сильнопересеченной — 0,15.

Удельное содержание дорог:

с грунтовыми поверхностями — 0,45;

дорог с твердыми поверхностями — 0,50.

Для расчета кривизны маршрута в плане задаются полигоны распределения радиусов и углов поворотов. Для расчета кривизны маршрута в плане принято количество поворотов на километре маршрута:

для равнинной местности — 3;

для умереннохолмистой — 4;

для холмистой — 5;

для сильнопересеченной — 6.

Направления поворота (влево, вправо) принято равновероятным. Чередование типов дорожных поверхностей принято равновероятным. Длины отрезков дорог с различными типами поверхностей имеют равномерное распределение вероятности появления в интервале от 100 до 1000 метров [2].

Таким образом, с использованием рассмотренной выше математической модели в ходе настоящих исследований разработан вариант статистического маршрута, общая длина которого была принята и составила 50 км. Важным вопросом при формировании маршрута является разбивка по видам дорог. На основе данных В. Ф. Платонова была принята разбивка по видам дорог, в которой доля дорог I—III категорий с твердым покрытием составляет 50 %, доля грунтовых дорог различного состояния — 45 %, доля местности — 5 %. В свою очередь, дороги с твердым покрытием были разбиты на два вида: асфальтобетонное шоссе и булыжную дорогу ровного замощения в отношении 2:3, которые, в свою очередь, состояли из удовлетворительных и изношенных участков. Грунтовые дороги были разбиты на два типа: грунт удовлетворительного состояния и разбитый грунт в отношении 3,5:1. Грунтовые дороги удовлетворительного состояния включают и гравийно-щебеночные удовлетворительные и изношенные участки.

При моделировании представительного маршрута учитывалось, что большее влияние на величину средней скорости движения колесной машины по всему маршруту будут оказывать количество и виды переходных процессов при переходе с одного однородного участка (по типу покрытия) на другой. Поэтому маршрут был составлен таким образом, чтобы эти переходы встречались по случайному распределению и в то же время все возможные варианты переходов присутствовали на маршруте.

Кроме того, некоторые параметры дорожных условий не присутствовали на некоторых типах покры-

тий. То есть считалось, что асфальтобетонное шоссе в удовлетворительном состоянии абсолютно ровное (по микропрофилю) и недеформируемое, а параметры грунта, оказывающие влияние на проходимость колесной машины, задавались лишь при движении по разбитому грунту и местности.

Разбивка по величине продольных уклонов дороги (макропрофиль) произведена следующим образом. Предполагалось, что маршрут проложен кольцевым в среднeperесеченной местности в условиях западной части России, начинается и заканчивается в одном уровне. По статистическим данным принято, что величина максимального подъема (спуска) на участках маршрута зависит от типа покрытия и составляет: для асфальта — 3°; булыжного шоссе — 5°; для грунтовых дорог различного состояния — 7°, пересеченной местности — 9°. При этом считалось, что максимальные углы уклонов дороги встречаются не более чем на 30 % протяженности каждого типа покрытия, в остальных случаях величины этих углов составляли меньшую величину.

Разбивка по величине радиусов закруглений дороги в плане и участков поворота была проведена также по статистическим данным дорог западной части России. Кроме того, для каждого типа покрытия был введен поворот на 90° с радиусом в 30 м для проверки маневренных свойств машины.

При введении в маршрут участков с низкой несущей способностью грунта для проверки ограничений по проходимости учитывалось, что маршрут будет проходить по рыхлому суглинку ($C_r=0,25$,

$\mu=0,5$), песку ($C_r=1,0$, $\mu=0,25$) и пахоте ($C_r=0,5$, $\mu=0,5$), а также по уплотняемому задерненному грунту ($C_r=1,0$, $\mu=1,0$).

При описании микропрофиля задавалась функция ординаты неровности в зависимости от пройденного пути, полученная через спектральные плотности для различных типов покрытий. При этом для того, чтобы получить различные ординаты под колесами одной оси машины реализация микропрофиля подавалась под различные борта шасси со случайным сдвигом по фазе.

Библиографический список

1. Келлер, А. В. Методологические принципы оптимизации распределения мощности между движителями колесных машин / А. В. Келлер // Вестник ЮУрГУ — Челябинск : Изд. ЮУрГУ, 2006. — № 11(№ 66). — С. 96–101.
2. Пирковский, Ю. В. Теория движения полноприводного автомобиля (прикладные вопросы оптимизации конструкции шасси) / Ю. В. Пирковский. — М. : ЮНИТИ, 2000. — 310 с.

УСИКОВ Виталий Юрьевич, майор, преподаватель кафедры эксплуатации бронетанковой и автомобильной техники.

УШНУРЦЕВ Станислав Владимирович, лейтенант, офицер отдела (организации научной работы).

Адрес для переписки: stanislavushnurcev@mail.ru

Статья поступила в редакцию 26.02.2013 г.

© В. Ю. Усиков, С. В. Ушнурцев

УДК 621.81

В. Р. ЭДИГАРОВ
В. В. ДЕГТЯРЬ
В. В. МАЛЫЙ

Омский филиал
Военной академии материально-
технического обеспечения

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ФРИКЦИОННО-ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ МОДИФИЦИРОВАНИИ

Приведены результаты исследования и математического моделирования температурных параметров в зоне обработки при фрикционно-электрическом модифицировании стальных поверхностей трения.

Ключевые слова: модифицирование, площадь контакта, шероховатость, плотность электрического тока, технологические параметры.

Непрерывно возрастающие требования к качеству выпускаемых машин связаны с необходимостью повышения их надежности, которая в значительной мере определяется эксплуатационными свойствами отдельных деталей.

Эксплуатационные свойства деталей машин существенно зависят от качества поверхностного слоя, определяемого геометрическими (макроотклонения, шероховатость) и физико-механическими (микротвердость, структура, остаточные напряжения) пара-

метрами. Все эти параметры зависят от технологии изготовления деталей.

Большими потенциальными возможностями значительного повышения параметров качества поверхностных слоев деталей трибоузлов обладают электромеханическая обработка и одна из ее разновидностей — фрикционно-электрическое модифицирование [1], основанные на фрикционно-силовом воздействии инструмента на заготовку, сопровождающимся локальным нагревом металла с помощью