

Концепция и методы имитационных ресурсных испытаний мобильной техники (сообщение 2)

Березин И.Я., Абызов А.А.

Челябинский государственный технический университет

Во втором сообщении иллюстрируется применение разработанной модели движения к задачам прогнозирования эксплуатационной нагруженности и надежности элементов транспортных машин.

Как отмечалось ранее, комплексное моделирование процесса эксплуатации открывает возможность на ранних этапах проектирования транспортной машины, когда элементы проекта разработаны лишь в чертежах, решать широкий круг задач по рациональному выбору конструктивных параметров и обеспечению требуемых характеристик безотказности и ресурса.

Поскольку современная транспортная машина представляет собой связанную динамическую систему, интенсивно взаимодействующую с многофакторной случайной средой при участии человека-оператора, то целесообразно на первом этапе исследований при решении задачи статистической динамики ограничиться определением вероятностных характеристик воздействий на тяжелонагруженные элементы системы. Это позволяет устанавливать спектральный состав и особенности процессов нагружения, получать законы распределения максимумов, выявлять качественное и количественное влияние динамических характеристик проектируемой машины на нагруженность ответственных деталей в условиях реальной эксплуатации. Результаты анализа в последующем используются для коррекции динамических свойств исходного варианта проекта, а также для обоснованного выбора режимов программных стендовых испытаний узлов и деталей на стадии опережающей отработки элементов конструкций.

На втором этапе полученные ранее процессы силового и кинематического взаимодействия преобразуются в процессы изменения напряжений и перемещений, которые в последующем используются в моделях формирования усталостных, износных, термомеханических и других видов отказов. Отображение в моделях накопления повреждений рассеяния прочностных характеристик позволяет представить окончательные результаты моделирования в виде функций вероятностей безотказной работы, параметров интенсивности отказов, средней наработки на отказ, гамма-процентного ресурса и др. По результатам прогнозирования характеристик надежности может быть выполнена вторая коррекция исходного варианта проекта по конструкторско-технологическим и прочностным свойствам узлов и деталей. Блок-схема комплексного моделирования процесса эксплуатации представлена на рис. 1; сделаем некоторые пояснения к этой схеме.

В качестве исходной информации вводится описание формализованных характеристик воздействия внешней среды на транспортное средство. Применительно к машинам, предназначенным для эксплуатации на местности вне обустроенных дорог, возникает необходимость задания комплекса факторов внешнего воздействия, в частности:

- двумерного поля микропрофиля местности, описывающего воздействие на ходовую часть со стороны левой и правой колеи (функции изменения высоты микропрофиля под j -й подвеской i -го борта $h_{I,j}$). Кинематическое возбуждение микропрофиля определяет общий уровень и характер динамических процессов в системе "подвеска - корпус - гусеница - силовая установка", а также накладывает ограничение на скорость движения машины в связи с интенсивным вибрационным воздействием на экипаж;
- дорожной кривизны (радиус поворота R), которая значительно ограничивает скорость движения машины по заносу и приводит к перераспределению усилий в ходовой системе и трансмиссии;

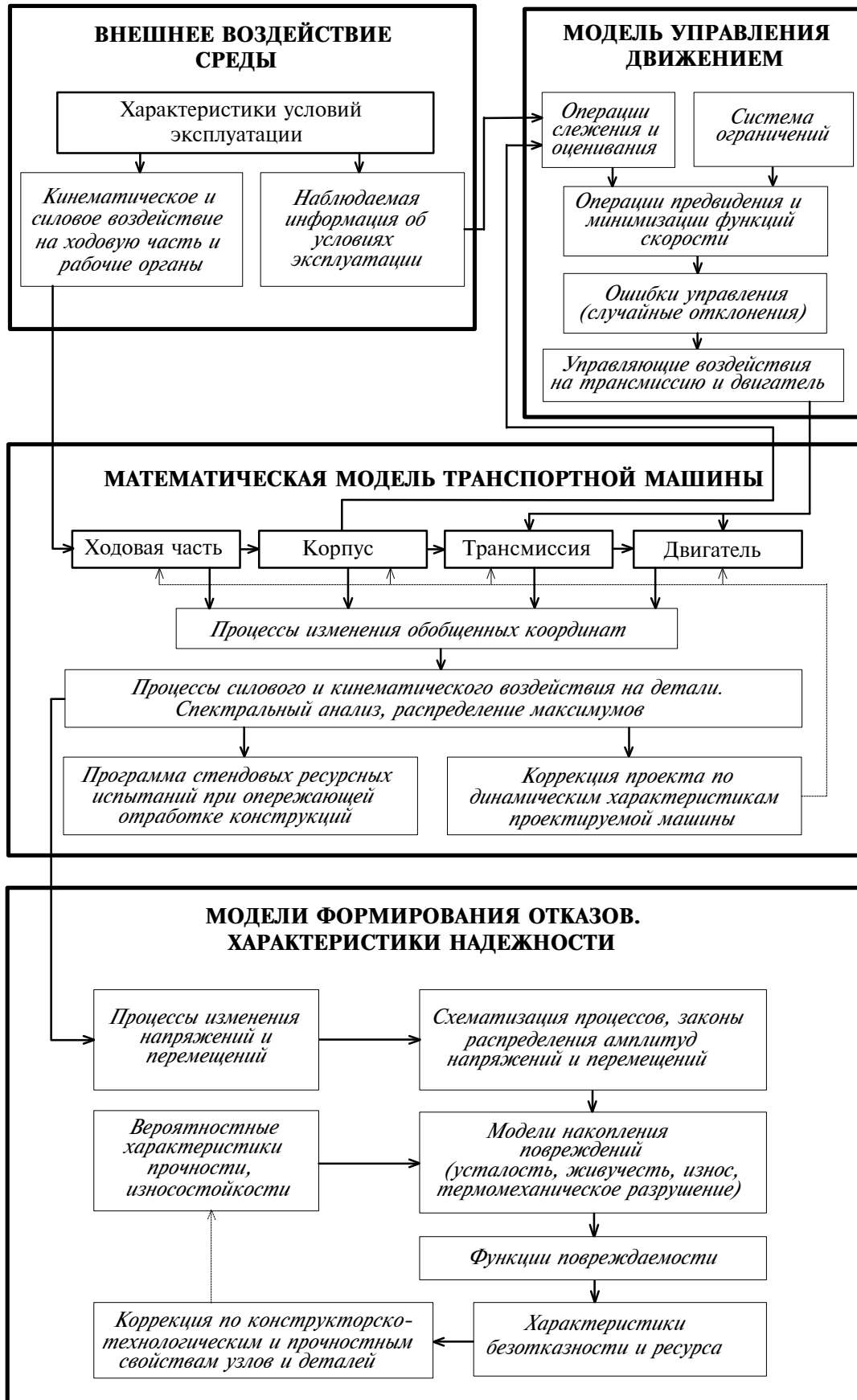


Рис. 1. Блок- схема комплексного моделирования

- макропрофиля трассы (угол подъема-спуска g_n), описывающего длинные подъемы, спуски и накладывающего ограничения по тяговой и тормозной характеристикам;
- одиночных препятствий (выступы или впадины длиной L и высотой или глубиной H), наличие которых на местности существенно изменяет скорость движения и вызывает возникновение пиковых нагрузок в связанной динамической системе;
- характеристик жесткости дорожного полотна (жесткость грунта C_g), определяющих условия взаимодействия движителя транспортной машины с грунтом и характер нагруженности элементов ходовой системы;
- характеристик процесса изменения сил сопротивления со стороны рабочего органа (главный вектор \vec{R} и главный момент \vec{M});
- распределения переменных сил сопротивления грунта прямолинейному движению (коэффициент сопротивления f) и повороту (коэффициент сопротивления μ_c);
- параметров, описывающих условия наблюдения и оценивания факторов внешней среды человеком- оператором (расстояние видимости трассы L_v).

Наряду с перечисленными факторами внешней среды на динамику транспортной машины значительно влияет скорость её движения, которая в условиях эксплуатации на местности вне обустроенных дорог варьируется в широком диапазоне значений. Необходимость учета этого обстоятельства подтверждают экспериментальные и расчетные исследования. Так, расчетные среднеквадратические отклонения катковой нагрузки, полученные для средней скорости движения по трассе, почти в 1,5 раза превышают аналогичные экспериментальные значения, соответствующие режиму естественного вождения гусеничной машины. Как показывает опыт, подобное различие может привести к принципиальной ошибке в оценке долговечности. В связи с этим для адекватного описания динамических процессов необходимо задавать скорость движения по местности в виде функции пути, зависящей от технических характеристик проектируемой машины с одной стороны, и ряда технических и эргономических ограничений, с другой.

В основу предлагаемого подхода положено представление о том, что благодаря управляющим воздействиям человека-оператора на трансмиссию и двигатель осуществляется варьирование скорости движения транспортной машины так, что функция изменения скорости приводится в соответствие с дорожной обстановкой при условии минимума времени, затрачиваемого на преодоление характерных участков местности. Система ограничений скорости включает:

- ограничения по пиковому значению и по величине среднеквадратического отклонения вертикального ускорения на месте водителя; предельные значения названных ограничений устанавливаются путем проведения технико-биологических исследований с целью обоснования медицинских норм для мобильной техники различного назначения;
- ограничение по заносу машины при прохождении криволинейных участков трассы; предельное состояние определяется максимальным значением сопротивления грунта поперечному сдвигу, зависящему от свойств грунта и конструкции движителя проектируемой машины;
- ограничение по тяговой динамике, определяемое тяговой характеристикой силовой установки;
- ограничение, связанное с возможностью осуществления операций наблюдения и оценивания дорожной ситуации в процессе движения с целью отработки адекватного управляющего воздействия на силовую установку.

Функция изменения скорости машины по пути определяется из условия минимизации функций предельных скоростей по перечисленным видам ограничений; при этом минимизирующие функции являются предельными функциями пути по отдельным видам ограничений, а именно: пикам и среднеквадратическому отклонению перегрузок, заносу, тяговой динамике и условиям наблюдения.

Рассмотрим методику выбора скорости движения по каждому из ограничений.

Ограничения по тяговой динамике возникают в случаях, когда силы сопротивления движению, обусловленные свойствами грунта и подъемом макропрофиля, превысят максимальное тяговое усилие, развиваемое силовой установкой на данной

передаче. В этих случаях алгоритм расчета предусматривает переход на низшую передачу. При движении машины на спуске скорость ограничивается максимальным тормозным усилием. Следовательно, для каждого участка трассы может быть определен номер наивысшей передачи, на которой возможно движение рассматриваемой машины.

При движении в режиме поворота максимально допустимая скорость, на которой еще не возникает занос машины, зависит от свойств грунта, радиуса поворота и особенностей гусеничного движителя. В соответствии с [7] это значение может быть определено

с помощью следующего выражения: $V_r = 1 + B\sqrt{gRm_{max}} / (2R)$, где B — ширина колеи машины, R — радиус поворота, g — ускорение свободного падения, m_{max} — максимальное значение коэффициента сопротивления повороту.

Для обеспечения безопасности в условиях ограниченной видимости скорость движения машин различного назначения также необходимо снижать в соответствии с нормами вождения.

Наиболее сложным является вопрос выбора скорости движения, при которой перегрузки на месте водителя, вызываемые колебаниями корпуса, не превышают заданного уровня. В предлагаемой модели скорость движения на каждом участке трассы определяется в зависимости от двух факторов — типа микропрофиля и наличия одиночных препятствий.

В качестве одиночного препятствия на участке трассы с микропрофилем определенного типа предлагается выделять неровности, переезд которых требует дополнительного снижения скорости. Значения максимальной скорости, на которой рассматриваемая машина может преодолевать одиночные препятствия различной длины (L) и высоты (H), были получены с помощью расчетных экспериментов (рис. 2).

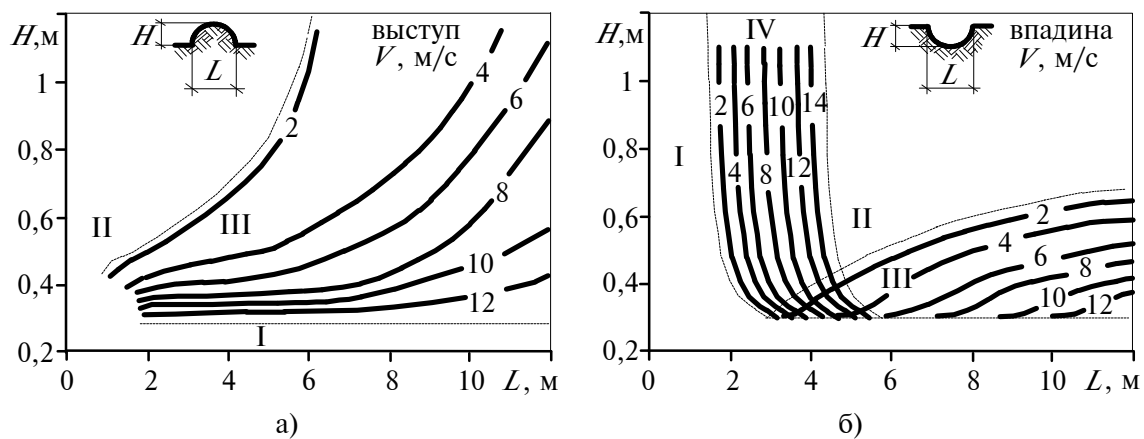


Рис. 2. Ограничения скорости при преодолении одиночных препятствий

Анализ полученных результатов позволил выявить ряд закономерностей. Для уменьшения перегрузок при преодолении неровностей типа "выступ" скорость движения машины необходимо снижать всегда; при этом наименьшая скорость требуется для переезда высоких и коротких неровностей (рис. 2а). Неровности типа "впадина" могут преодолеваться двумя различными способами: на большой скорости, когда машина "перепрыгивает" препятствие, и на малой скорости — путем "переползания". В связи с этим на рис. 2б выделены четыре зоны сочетания параметров L и H : в зоне I неровности могут преодолеваться на любой скорости; в зоне IV возможно "перепрыгивание", для чего скорость должна быть выше указанного на рисунке значения; в зоне III неровности преодолеваются путем "переползания" и скорость должна быть ниже указанной; преодоление препятствий из зоны II на любой скорости вызывает недопустимые перегрузки. Как видно из рисунка, зоны III и IV перекрываются; здесь скорость должна быть либо меньше одного значения, либо больше другого. Подобные зависимости могут быть получены для различных машин путем расчетных экспериментов.

Для участков местности, не содержащих одиночных препятствий, микропрофиль обычно описывается стационарными случайными функциями. Максимальная скорость движения по таким участкам определяется в соответствии с эргономическими нормами путем расчетных экспериментов.

Проверка адекватности подсистемы корректировки скорости движения выполнена на основе сопоставления расчетных и экспериментальных данных. Так, например, отличие значений среднеквадратических отклонений катковой нагрузки, полученных экспериментально и с помощью разработанной модели, составляет 8...10%, а отличие аналогичных параметров, полученных в расчете на среднюю скорость движения, достигает 50%. Эти данные демонстрируют существенное повышение достоверности результатов при использовании модели с коррекцией скорости движения.

При компьютерной реализации метода имитационных ресурсных испытаний целесообразно задавать многопараметрическое воздействие среды в виде формализованного представления типовых условий эксплуатации. Для этого удобно использовать картографическое описание известных испытательных станций и полигонов, которыми располагают отрасли-производители сельскохозяйственной, автомобильной, дорожно-строительной и другой инженерной техники. Традиционно трассы этих полигонов используются в качестве эталонных для проведения определительных и контрольно-сдаточных испытаний техники различного назначения.

Использование предлагаемого подхода рассмотрим на примере участка трассы одного из полигонов (рис. 3). Этот участок длиной 600 метров содержит два одиночных препятствия типа выступа и впадины, четыре поворота и крутой спуск.

На трассе полигона выделены фрагменты, микропрофили которых не содержат одиночных препятствий и описываются стационарными случайными процессами. В зависимости от максимально возможной скорости движения, при которой среднеквадратические отклонения ускорений на месте водителя не превышают допустимых, микропрофиль каждого такого фрагмента отнесен к одному из пяти типов и задается двумя некоррелированными случайными процессами: высотой по средней линии трассы $h(s)$ и углом поперечного наклона $y(s)$, где s - пройденный путь. Высоты микропрофиля правой и левой колеи $h_1(s)$ и $h_2(s)$ могут быть получены из этих процессов: $h_1(s) = h(s) + y(s) \cdot B/2$, $h_2(s) = h(s) - y(s) \cdot B/2$ (B - ширина колеи).

Случайная поверхность дороги на рассматриваемом участке соответствует микропрофилям типа II и III. Среднеквадратические отклонения процессов $h(s)$ и $y(s)$ и максимальные скорости движения для таких микропрофилей имеют следующие значения:

тип микропрофиля	σ_h , м	σ_j , рад	V_{max} , м/с
II	0,179	0,0149	11
III	0,207	0,0165	9,3

Нормированные эмпирические корреляционные функции процессов $h(s)$ и $y(s)$ аппроксимированы выражением:

$$K(x) = \sum_{i=1}^2 (A_i e^{-(a_i x)^2} \cos(b_i x)) .$$

Входящие в это выражение коэффициенты имеют следующие значения:

тип микропрофиля	A_1	A_2	α_1 , м ⁻¹	α_2 , м ⁻¹	β_1 , м ⁻¹	β_2 , м ⁻¹
продольный микропрофиль						
II	1	0	0,0048	0	0,242	0
III	0,9	0,1	0,002	0,0018	0,164	0,5
поперечный микропрофиль						
II	0,7	0,3	0,006	0,0008	0	0,282
III	0,2	0,8	0,001	0,05	0,37	0,6

Профилограмма рассматриваемого участка приведена на рис. 3. По изложенной ранее методике для этого участка получены функции изменения максимальной скорости

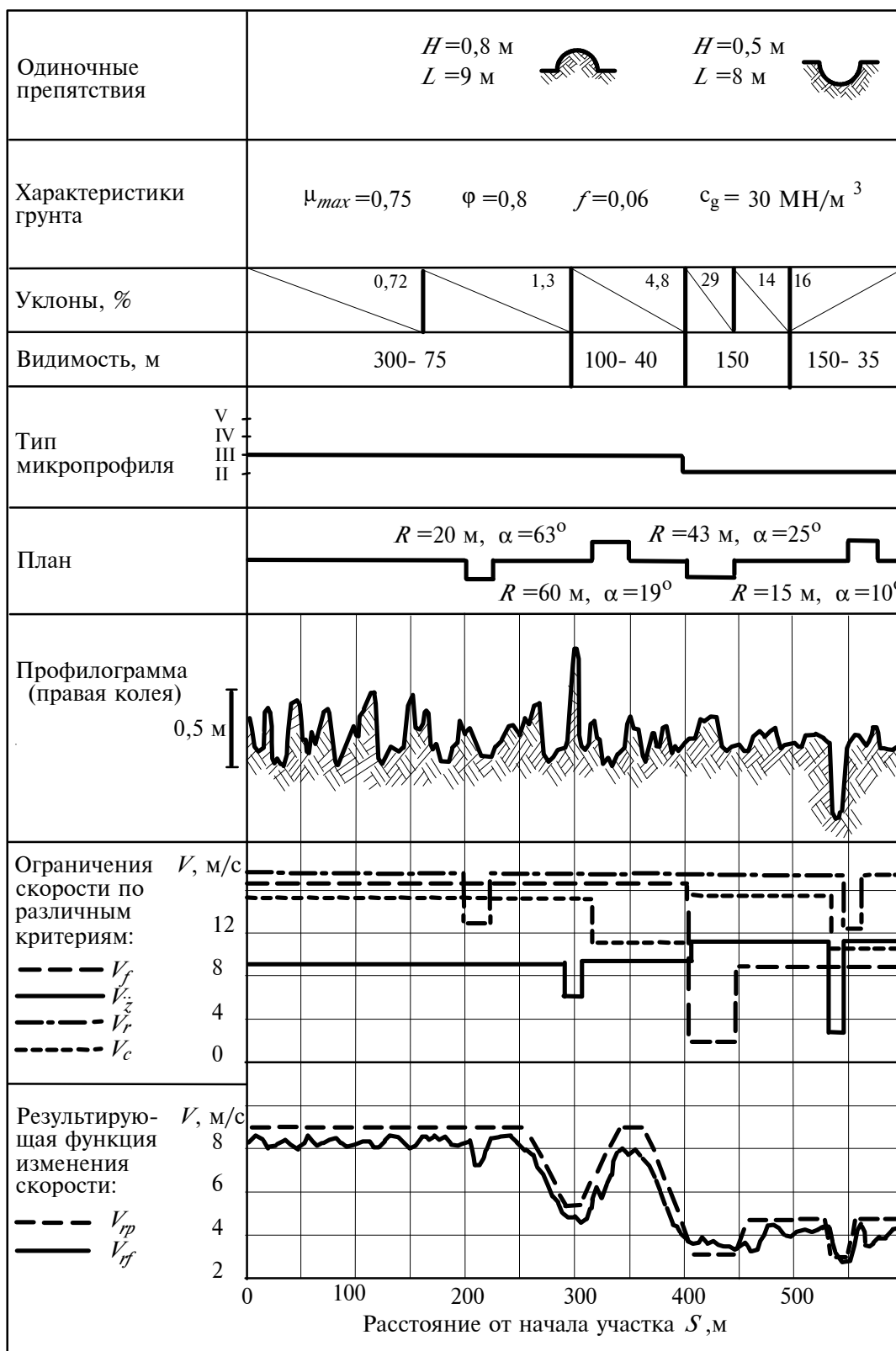


Рис. 3. Определение оптимальной скорости движения

движения, определяемой перегрузками на месте водителя ($V_{\ddot{z}}$), тяговой динамикой машины (V_f), условиями безопасности движения (V_c) и ограничениями по заносу (V_r). На рис. 3 приведены графики изменения этих ограничений по скорости для рассматриваемого участка, а также прогнозируемая результирующая функция изменения скорости, построенная с учетом характеристик разгона и трорможения машины (V_{pp}). Результирующая фактическая функция изменения скорости (V_{ff}) получена в процессе интегрирования уравнений движения и отображает влияние микропрофиля, переходных режимов, поворотов и других факторов.

Подобным образом формализуется описание всей трассы данного полигона. Многократное воспроизведение процесса движения транспортной машины по полигону сопровождается случайной вариацией функции скорости движения, которая задается генератором случайных ошибок управления и отображает естественную реакцию человека-оператора на изменение внешних условий. Необходимая продолжительность "испытаний" определяется путем непрерывной обработки реализаций и оценки репрезентативности получаемой информации по известным процедурам метода Монте-Карло.

Поскольку методика имитационных ресурсных испытаний ориентирована на решение задач прочностной надежности, то итоговые результаты этапа исследований динамики машин необходимо представлять в виде обобщенных статистических характеристик силового и кинематического воздействия на подлежащие проверке высоконагруженные элементы конструкций. В связи с этим случайные функции обобщенных координат, получаемые в процессе численного интегрирования уравнений движения, преобразуются через соответствующие передаточные функции в характеристики процессов изменения нагрузок и напряжений в конкретных узлах и деталях. Для этого в инженерной практике часто используют два подхода: первый применим к стационарным процессам, когда путем статистической обработки реализаций (например, по процедуре быстрого преобразования Фурье) могут быть получены обобщенные спектральные характеристики, а затем методами теории выбросов определены числовые параметры и законы распределения максимумов процесса изменения напряжений. Именно такие характеристики необходимы для решения задач прогнозирования прочностной надежности и ресурса. Второй подход не накладывает ограничений на стационарность исходного процесса (как отмечалось ранее, к такому классу относится задача моделирования процесса эксплуатации транспортных машин на местности). Подход предполагает определение эмпирических законов распределения амплитуд напряжений непосредственно из реализаций нестационарного процесса путем последовательного выполнения численных процедур и статистической обработки информации.

На рис. 4 в качестве иллюстрации приведена эмпирическая функция плотности распределения амплитуд касательных напряжений (τ_a) в торсионном вале передней подвески быстроходной гусеничной машины, соответствующая схематизации случайного процесса по методу максимумов. Поскольку в расчетах усталостной долговечности при случайном нагружении используется принцип суммирования повреждений от напряжений различного уровня, то возникает необходимость преобразования закона распределения амплитуд в блок нагружения, представляющий собой совокупность уровней амплитуд напряжений и соответствующих им чисел циклов (n), которые деталь "нарабатывает" в пределах единицы параметра долговечности. На рис. 5 приведен блок нагружения, соответствующий 1 км пробега в заданных условиях.

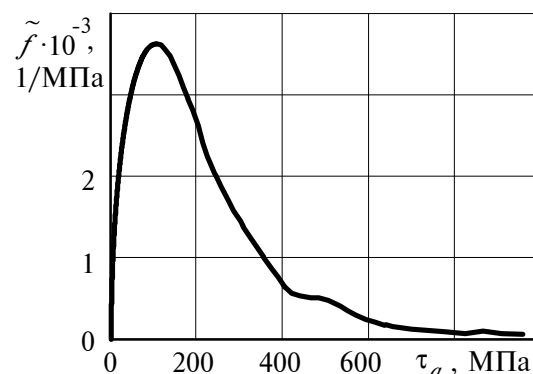


Рис. 4. Эмпирическая функция плотности распределения амплитуд касательных напряжений в торсионном вале

В таком представлении информация об эксплуатационной нагруженности деталей может быть использована на этапе лабораторной доводки конструкций для обоснован-

ного назначения программы стендовых испытаний с одной стороны, и расчетной оценки характеристик надежности, с другой. На рис. 6 сопоставлены расчетные функции вероятностей безотказной работы торсиона передней подвески гусеничной машины по критерию усталостного разрушения, соответствующие серийной машине и варианту машины с увеличенной массой (L_n , L - гарантийный и заданный пробег машины).

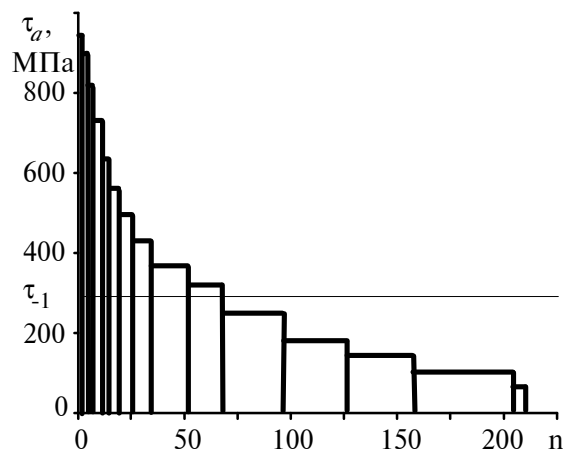


Рис. 5. Блок нагружения торсиона

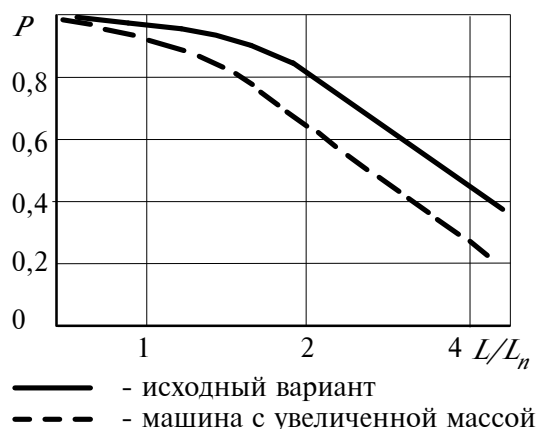


Рис. 6. Функция надежности торсиона передней подвески

Подобным образом выполняется прогнозирование характеристик надежности по критериям усталостного и износового повреждения элементов ходовых систем и силовых установок транспортных машин различного назначения.

Работа выполнена при финансовой поддержке программ "Университеты России (технические университеты)" и "Сельхозмашиностроение".

Литература

1. Аврамов В.П., Калейчев Н.Б. Динамика гусеничной транспортной машины при установившемся движении по неровностям.- Харьков: Выща школа. Изд-во при Харьковском университете, 1989.-112 с.
2. Березин И.Я., Абызов А.А. Концепция и методы имитационных ресурсных испытаний мобильной техники (сообщение 1)//Динамика, прочность и износостойкость машин. Выпуск 2, 1996.- С. 61- 68.
3. Березин И.Я., Будинский С.Ю., Усольцев П.В. Регулирование скорости в задаче моделирования движения транспортной машины по случайному профилю// Исследование силовых установок и шасси транспортных и тяговых машин.- Челябинск, 1985.- С. 118- 121.
4. Быков В.В. Цифровое моделирование в статистической радиотехнике.- М.: Советское радио, 1971.- 326 с.
5. Вейц В.Л., Коловский М.З., Кочура А.Е. Динамика управляемых машинных агрегатов.- М.: Наука, 1984.- 352 с.
6. Дмитриев А.А., Чобиток В.А., Тельминов А.В. Теория и расчет нелинейных систем поддресоривания гусеничных машин.- М.: Машиностроение, 1976.- 207 с.
7. Забавников Н.А. Основы теории транспортных гусеничных машин.- М.: Машиностроение, 1968.- 396 с.
8. Никитин А.О. К вопросу исследования динамических качеств гусеничной машины при повороте //Туды ВАБТВ, N 180.- М.: 1960.- С. 13-25.
9. Прахиловский И.Г. Исследование вероятностных характеристик поверхностей распространенных типов дорог и их сравнительный анализ// Труды семинара по подвескам автомобилей. Вып. 15.- М.: ОНТИ НАМИ, 1968.- С. 22- 48.
10. Савочкин В.А., Дмитриев А.А. Статистическая динамика транспортных и тяговых гусеничных машин.- М.: Машиностроение, 1993.- 320 с.