

Р.Ю. Добрецов

**Частные вопросы оценки
энергоэффективности шасси гусеничных
машин**

монография

**Москва
Издательство Нобель Пресс**

УДК 62-63
ББК 30.6
Р11

Р11 **Р.Ю. Добрецов**
Частные вопросы оценки энергоэффективности шасси гусеничных машин: монография / Р.Ю. Добрецов – М.: Lennex Corp,
— Подготовка макета: Издательство Нобель Пресс, 2013. – 100 с.

ISBN 978-5-518-39734-7

В развитие методики объективной комплексной оценки энергоэффективности гусеничного шасси рассматриваются вопросы эффективности использования опорной поверхности при передаче нагрузок, оценки энергоэффективности механизмов поворота гусеничной машины. Приведены примеры реализации теоретических положений, полученных при разработке моделей взаимодействия гусеницы транспортной (быстроходной) машины с недеформируемым и деформируемым основанием.

Книга предназначена для аспирантов; преподавателей высших учебных заведений; специалистов в области проектирования, изготовления, эксплуатации наземных транспортных систем. Может быть полезна студентам старших курсов, обучающихся по программам специалитета и магистратуры (направление 190100 «Наземные транспортно-технологические комплексы») и занятым выполнением научно-исследовательских и выпускных квалификационных работ.

ISBN 978-5-518-39734-7

© Издательство Нобель Пресс, 2013
© Р.Ю. Добрецов, 2013

Оглавление

Введение	2
1. Общая методика теоретической оценки энергоэффективности шасси транспортных гусеничных машин	4
2. Проблема эффективности работы гусеничного движителя в области малых значений удельной тяги	15
3. Эффективность использования опорной поверхности при передаче нормальных нагрузок	29
4. Оценка энергоэффективности механизмов поворота	61
5. Повышение энергоэффективности шасси гусеничных машин	75
Заключение	95
Список литературы	97

Введение

Гусеничное шасси остается востребованной основой при разработке транспортных, технологических, строительно-дорожных, боевых машин. При этом по-прежнему актуальна проблема поиска обоснованного компромисса при выборе тактико-технических характеристик шасси. Этим обусловлена потребность в научно обоснованной методике, позволяющей проводить сравнение вариантов конструкции проектируемой машины или различных машин.

Одним из вариантов такой методики, предназначенной, в первую очередь, для анализа технических решений в практике конструирования и эксплуатации транспортных гусеничных машин (ТГМ), является подход, описанный в [10]. Основные положения методики распространяемы также и на гусеничные шасси другого назначения с учетом специфики их эксплуатации. Подобное развитие методики возможно благодаря принципиально не ограничиваемому числу рассматриваемых частных показателей эффективности, используемых при формировании обобщенного показателя энергоэффективности шасси. Математической основой аппарата сравнения является метод, использующий функции желательности (метод Харрингтона). Основные положения методики кратко приводятся в тексте книги, подробное описание доступно в [10].

Дальнейшая работа над анализом частных показателей эффективности узлов и агрегатов шасси гусеничной машины привела не только к некоторому расширению их номенклатуры, обновлению методики определения величин, уточнению границ изменения и др.. Возникла необходимость рассмотреть не описанные в известных литературных источниках режимы работы двигателя и предложить новые математические модели. Развитием этих моделей является не входящий в данную работу вопрос о расширении теоретического описания поворота ТГМ.

Энергоэффективность шасси ТГМ определяется в большой степени особенностями работы механизмов поворота. Приведена новая методика расчета энергетических характеристик механизмов поворота, уточнены методы определения величин частных показателей их энергоэффективности.

Анализ энергоэффективности шасси ТГМ различного назначения привел к ряду предложений по модернизации ходовых систем конкретных машин и конструированию элементов двигателя. Эти предложения представлены в отдельной (заключительной) главе.

Практической ценностью (помимо собственно методики сравнительного анализа энергоэффективности шасси гусеничных машин) обладают рекоменда-

ции по выбору характеристик элементов гусеничного движителя, методика расчета моментов и мощностей, проходящих через механизмы поворота.

Применение практических рекомендаций и основных результатов анализа энергоэффективности шасси представляется наиболее актуальным при работе над конструкциями шасси новых транспортных, технологических и военных гусеничных машин, предназначенных для эксплуатации на грунтах со слабым поверхностным слоем (районы Крайнего Севера) и на снегу.

В разделе «Заключение» сформулированы перспективные темы исследований, вытекающие из представленных в основной части книги разработок.

1. Общая методика теоретической оценки энергоэффективности шасси транспортных гусеничных машин

Шасси большинства современных серийно выпускаемых ТГМ разрабатывались для нужд военно-промышленного комплекса. Поэтому при конструировании не редко на второй план отходили вопросы потерь мощности, сопровождающих работу агрегатов, а аспекты минимизации нанесения ущерба окружающей среде могли не рассматриваться. Более того, существует стереотип, что попытки обеспечения «экологической безопасности» гусеничного движителя обычно противоречат решению задач по реализации максимальной проходимости, подвижности, хороших динамических характеристик машины.

Другим стереотипом, характерным для отрасли, является частое обращение к авторитету прототипа. Это обычно не приводит к унификации узлов различных машин, но тормозит развитие конструкций узлов и агрегатов. Научное обоснование вносимых в конструкцию узлов и агрегатов изменений, выявление связи между конкретными (частными) показателями эффективности работы подсистем и шасси в целом, позволяют преодолеть эти стереотипы.

Наиболее информативным и универсальным параметром для анализа эффективности любого механизма в большинстве случаев являются потери мощности, сопровождающие его работу. Шасси ТГМ включает себя силовую установку, трансмиссию и ходовую часть. Очевидно, что отдельные системы, составляющие шасси, могут работать в различных режимах. Для некоторых режимов можно выделить процессы, определяющие в данных конкретных условиях эффективность работы агрегатов и систем. При изменении условий движения машины выделенный процесс перестает быть определяющим, сопровождающие его эффекты «теряются» на фоне текущего энергетического баланса системы.

Например, качение шасси при действии малых удельных сил тяги ($f_d < 0,12$) сопровождается интенсивными колебаниями траков под опорным катком, что связано со значительными потерями энергии и другими негативными последствиями. Такой режим движения является достаточно типичным для быстроходной ТГМ, что не позволяет пренебречь им [14]. Однако при буксовании движителя эффект неустойчивости траков перестает быть значимым. В пределе наступает потеря подвижности машины и можно говорить о том, что к.п.д. шасси устремляется к нулю.

Из этого следует, что для сравнительной оценки энергозатрат в шасси (энергоэффективности шасси) различных машин недостаточно сложить относи-

тельные потери мощности (или перемножить значения к.п.д.) агрегатов, выбрав некоторые «среднестатистические» условия движения ТГМ. Следует учесть специфику работы узлов, агрегатов и систем на различных режимах и выбрать методику, позволяющую получить количественную и объективную оценку энергозатрат в шасси. Такая методика должна опираться на систему показателей эффективности конструкции подсистем, позволяющую в комплексе оценить уровень потерь мощности в шасси и (в частности) рациональность конструкции ходовой системы с точки зрения условий формирования тягового усилия и уровня воздействия на опорное основание [4].

В современных условиях, когда возможности по форсированию силовой установки практически исчерпаны, а серийное производство новых, более мощных двигателей для ТГМ не начато, становится весьма актуальным вопрос о минимизации потерь мощности в узлах шасси машины и выявления наиболее рациональных путей реализации тягового усилия. Кроме этого, все более существенную роль начинают играть быстроходные ТГМ гражданского назначения, для которых вопросы экономичности и экологичности являются принципиально важными.

Сказанное позволяет заключить, что работы, направленные на снижение энергозатрат на передвижение шасси ТГМ военного и хозяйственного назначения при одновременном снижении вредного воздействия на окружающую природную среду, являются актуальными как в теоретическом, так и в практическом плане.

Для оценки энергоэффективности шасси разработана методика объективной количественной оценки эксплуатационных и технических характеристик шасси ТГМ. Методика комплексно учитывает конкретные количественные технические (конструктивные) параметры шасси, определяющие потери мощности; эффективность формирования тяговых сил на опорной поверхности машины; экологические показатели и т.д.

С помощью предлагаемой методики проводился анализ типичных конструкций базовых шасси современных ТГМ и выявлялись перспективные пути комплексной модернизации конкретных образцов шасси с целью снижения потерь мощности и улучшения других технических и эксплуатационных характеристик.

Применительно к транспортным машинам в настоящее время предложены три основных подхода к построению обобщенного показателя, характеризующего уровень эксплуатационных свойств.

Традиционно для транспортной техники эффективность работы и уровень эксплуатационных свойств определяется спецификой маршрутов и расчетными объемами перевозок [43] или величиной удельной условной грузоподъемности [52].

Постановка и решение прямой задачи оптимизации [35,54] – задача, не представляющаяся неразрешимой, но сопряженная с преодолением весьма сложных проблем. Главная из них – предложить целевую функцию (или функционал). Кроме того, потребуется доказать, что минимума (максимума) целевой функции можно достигнуть, оставаясь в реальных пределах изменения эксплуатационных и технических параметров; преодолеть проблему взаимозависимости отдельных параметров; учесть дискретность изменения параметров; выбрать метод решения задачи. Решение задачи оптимизации требует рассмотрения изменений состояния изучаемого объекта при варьировании значений параметров. В идеале для проверки принятых решений требуется провести серии дорогостоящих экспериментов. Остается проблематичным распространение результатов решения задачи на другие образцы шасси. В связи с перечисленными проблемами практического распространения такой подход не получил.

Более распространенными являются методы экспертных оценок (МЭО) [30,37]. Методы этой группы несвободны от субъективности, так как вклад каждого частного параметра в значение общего показателя существенно зависит от величины весового коэффициента. Кроме того, метод требует привлечения большого количества независимых друг от друга высококвалифицированных специалистов, на что трудно рассчитывать в вопросах, связанных с проектированием и эксплуатацией шасси ТГМ. Предлагаемый в работе [28] метод получения интегрального показателя подвижности транспортной машины, в сущности, является разновидностью МЭО. В этом случае итоговый показатель формируется, как интегральное среднее частных показателей.

С точки зрения теории планирования эксперимента и теории принятия решений рассматриваемая задача о построении метода комплексной оценки шасси весьма близка к задачам о построении обобщенного отклика сложной многопараметрической системы, включающей в себя некоторое ограниченное сверху множество подсистем.

Математически можно записать: $Y = F(y_1, y_2, \dots, y_n)$.

В этой формуле $\{y_i(x_j)\}$ – обобщенные (комплексные) показатели, характеризующие состояние объекта. В свою очередь, элементы $\{y_i(x_j)\}$ являются

функциями от $\{x_j\}$ – набора параметров количественных (например, геометрических, массогабаритных, кинематических, силовых) и качественных (например, конструктивных признаков элементов шасси), множество которых состоит из элементов, обладающих свойствами воспроизводимости, однозначности, выражающихся количественно и одним числом.

Элементы множества $\{y_i(x_j)\}$ подбираются так, чтобы каждый имел собственный физический смысл. При этом учитывается, что попытка добиться оптимума за счет подбора некоторого локального или промежуточного параметра может оказаться неэффективной, или даже привести к неработоспособности технической системы.

Проведенный обзор методов построения обобщенного отклика сложной технической системы позволяет перечислить следующие требования к применяемому методу усреднения.

Метод должен:

- допускать работу с параметрами, разброс значений которых может быть большим; входные параметры должны иметь самостоятельный физический смысл, характеризовать работу определенной подсистемы в заданных условиях;
- учитывать последствия обнуления одного из параметров (например, застревание машины приводит к потере подвижности и невозможности решить поставленную задачу);
- включать в себя формализованную процедуру нормировки входных параметров;
- быть универсальным по отношению к входным параметрам разной физической природы;
- сочетать устойчивость итоговой оценки с чувствительностью по отношению к изменению значений входных параметров;
- давать итоговую оценку, выраженную числом;
- допускать расширение базы параметров и введение новых уровней в иерархии параметров.

Перечисленным требованиям в наиболее полной мере отвечают метод экспертных оценок, метод интегрального усреднения, метод Харрингтона [4,37]. Поскольку первые два метода требуют обязательного использования независимых экспертов (что не вполне гарантирует полную объективность оценок), выбор делается в пользу метода Харрингтона при условии использования стандартных шкал желательности.

Частные функции желательности задаются уравнением $d = \exp(-\exp[-y])$, где $y \in [-3, 7]$ – независимый параметр, получаемый путем нормировки значений частных показателей. Значение обобщенного отклика получаем по формуле: $D = \sqrt[k]{\prod_{l=1}^k d_l(x_1, x_2, \dots, x_n)}$ или $D = \sqrt[k]{\prod_{l=1}^k d_l(X)}$, где $X = \{x_j\}$, $j = \overline{1, n}$.

Рис. 1.1. дает представление о виде частной функции желательности на рассматриваемом интервале аргумента $y \in [-3, 7]$. При расчетах применялась стандартная шкала желательности. Интерпретацию количественных оценок, полученных с применением функции Харрингтона, позволяет дать табл. 1.1.

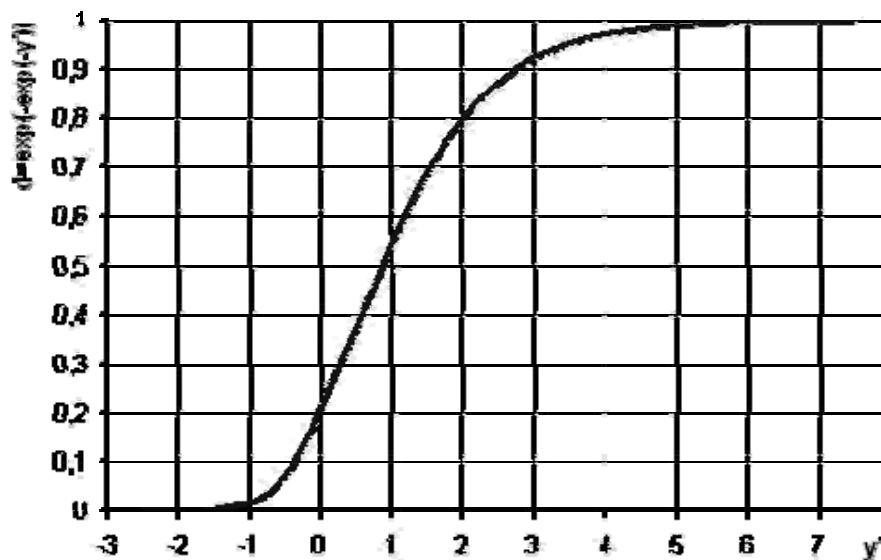


Рис. 1.1. Вид частной функции желательности (y' – аргумент, значение которого получено после нормировки y – значения частного показателя эффективности работы подсистемы)

Таблица 1.1.

Стандартные отметки на шкале желательности

Желательность	Отметки на шкале желательности $d(y)$	Соответствующие значения аргумента y
Очень хорошо	(1,00) 0,9975...0,80	(∞)5,990; 1,500
Хорошо	0,80...0,63	1,500; 0,772
Удовлетворительно	0,63...0,37	0,772; 0,006
Плохо	0,37...0,20	0,006; -0,479
Очень плохо	0,20... 10^{-7} (0,00)	-0,4759; -2,913 ($-\infty$)

Режимы движения ТГМ, на которых производится сравнительная оценка шасси, выбраны на основании статистики ОАО «ВНИИ Трансмаш» [51]:

- прямолинейное движение в транспортном режиме: коэффициент сопротивления качению $f = 0,078$, скорость движения $V = 6,5$ м/с;

- поворот: коэффициент сопротивления повороту $\mu_{\max}=0,7$; относительный радиус поворота $\rho=10$; скорость $V=7$ м/с;

- тест на положительное смещение траков проводится на бетонной плите).

Выбранный математический аппарат предназначен для работы со следующей номенклатурой частных показателей эффективности работы узлов и агрегатов шасси (рис. 1.2).

ЧАСТНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ШАССИ ТРАНСПОРТНОЙ ГУСЕНИЧНОЙ МАШИНЫ											
Показатель потерь мощности в узлах шасси.	Показатель полноты использования мощности.	Показатель сопротивления движению.	Показатель виброактивности гусеницы.	Относительные потери мощности в опорной ветви при малых тяговых усилиях.	Относительные потери натяжения в опорной ветви.	Показатель интенсивности колееобразования.	Показатель интенсивности разрушения грунта, связанного с юзом гусеницы.	Показатель оценки ущерба, наносимого твердым грунтам.	Эффективность работы системы подрессоривания.	Относительное увеличение потребной мощности двигателя при повороте.	Относительная мощность, рассеиваемая на элементе управления МП.
Эффективность работы при среднестатистических нагрузках			Эффективность работы при малых силах тяги			Интенсивность воздействия на опорное основание			Эффективность работы агрегатов при повороте		

Показатель уровня сопротивления прямолинейному движению представляет отношение функций сопротивления движению на грунте и на недеформируемом основании: $\Pi_{\psi} = (1 - \delta) / \psi$. Здесь ψ – значение функции относительного сопротивления движению для случаев движения по грунту и по недеформируемому основанию; δ – коэффициент буксования для рассматриваемых условий.

Показатель виброактивности гусеницы позволяет оценить неустойчивость траков при прохождении опорного катка по величине угла поворота звена

$$\varphi_i: \Pi_{\varphi} = \frac{\|\varphi_i(T_{\text{расч}})\|_{\infty}}{\|\varphi_i(T=0)\|_{\infty}} = \frac{\max\{|\varphi_i(T_{\text{расч}})|\}}{\max\{|\varphi_i(T=0)|\}}. \text{ Здесь } \varphi_i(T_{\text{расч}}) - \text{значение угла поворо-}$$

та звена за время прохождения катка при действии расчетного натяжения в рабочей ветви. Запись выражения в виде отношения кубических норм векторов φ_i является более компактной.

Показатель относительных потерь мощности в опорной ветви движителя при малых удельных тяговых усилиях. Колебания траков при прохождении опорного катка сопровождаются дополнительными потерями мощности ΔN . Оценивать их уровень можно с помощью показателя: $\Pi_s = \Delta N / N_{ft}$. Здесь N_{ft} – мощность на перемещение движителя в режиме идеального качения.

Показатель относительных потерь натяжения в опорной ветви. Перемещения траков приводят к снижению силы натяжения в опорной ветви гусеничного движителя на общую величину $\Delta T = \sum_{j=1}^n \Delta T_j$. Здесь ΔT_j – потери натя-

жения на активном участке цепи под катком j ; n – число опорных катков.

Оценивать эффективность формирования тяговых сил позволяет безразмерный показатель: $\Pi_T = \Delta T / T_p$. Здесь T_p – необходимое по условиям движения натяжение рабочей ветви.

За *показатель интенсивности колееобразования* предлагается принять отношение: $\Pi_H = q_{cp} / [q]$, где $q_{cp} = G_t / (2L_{оп} b_r)$ – нормальное давление под опорной поверхностью машины, Па (G_t – вес машины, Н; b_r – ширина гусеницы, м), $[q]$ – величина допускаемого нормального давления) [16].

Показатель интенсивности воздействия на деформируемое основание. Эффект юза траков сильно выражен на сыпучих грунтах, снеге, недеформируемом основании. За безразмерный показатель целесообразно принять отношение положительного смещения трака ΔL к длине опорной поверхности $L_{оп}$ при