

Теоретические проблемы тяговой характеристики трактора

Позин Б.М.

АО УРАЛТРАК

Тракторостроение как отрасль мировой экономики сложилось в начале 20-х годов нашего столетия. Трактор использовался, в основном, как тяговая машина в сельскохозяйственном производстве. Естественно, что наука о тракторе развивалась применительно к этой сфере его использования [2,3,6].

В середине 40-х, а у нас в стране - в 50-е годы, внутри тракторостроительной отрасли стала складываться и, к настоящему времени, сложилась новая подотрасль промышленного тракторостроения, занимающаяся проектированием, испытанием и изготовлением тракторов для потребностей дорожно-строительного машиностроения. Трактор становится энергетической и несущей основой землеройно-транспортного агрегата: бульдозера, скрепера, рыхлителя, погрузчика и т.д.

Тракторными дорожно-строительными агрегатами выполняется около 30% всех земляных работ в стране.

Работа трактора в составе землеройно-транспортного агрегата, характеризуется рядом особенностей: ярко выраженной цикличностью технологических процессов, накоплением грунта при копании, большими догрузками от технологического оборудования, переменными нагрузками и разнообразными грунтами.

Эти особенности существенно меняют требования к характеристикам трактора, его параметрам, конструктивному исполнению и делают некоторые научные результаты и рекомендации, выработанные общей теорией, неприемлемыми к промышленным тракторам. Так, сложившийся в практике конструирования уровень энергонасыщенности промышленных тракторов в 1,5-2 раза выше, а удельное тяговое усилие в 1,5-2 раза ниже, чем рекомендуемые общей теорией для сельскохозяйственных тракторов. Отсутствие достаточных научных обоснований приводит не только к низкой эффективности тракторных агрегатов, неоптимальным их параметрам, но и к серьезным ошибкам в области методологии, когда критерии оптимальности и методы, основанные на положениях общей теории, при дополнительной проверке для промышленных тракторов оказываются непригодными. Так, широко применяемая в качестве критерия оптимальности тяговая мощность, которая считается аналогом производительности, на самом деле для таких агрегатов, как бульдозер и скрепер, производительности неэквивалентна.

Классический подход к трактору как объекту оптимизации заключается в представлении о нем как о тяговой машине, обладающей одной связью с внешней средой (ходовой аппарат). Такое представление приводит к постановке задач оптимизации относительно свойств самой машины: тягового усилия, тягового КПД, усилия сопротивления движению, буксования и т.п.

Между тем трактор сам по себе работу не производит и применяется как тяговая, несущая и энергетическая основа агрегата. В тракторном агрегате (бульдозер, скрепер, пахотный агрегат и др.) в отличие от тяговой машины существуют две связи с внешней средой (ходовой аппарат и рабочее орудие). По свойствам второй связи тракторные агрегаты принципиально различаются. Так в сельскохозяйственном агрегате вторая связь (плуг, борона и др.) проявляется посредством постоянного (в среднем) тягового сопротивления и работа трактора в таком агрегате не отличается от работы тяговой машины. Иное дело промышленный агрегат. Посредством второй связи с грунтом промышленный тракторный агрегат, например бульдозер, накапливает и перемещает разрабатываемый грунт, что вызывает изменение тягового сопротивления, усиливающегося при траншейной разработке грунта и отсыпке его в кавальер за счет

изменения рельефа. Таким образом, значительное изменение тягового сопротивления является существенным признаком технологического процесса тракторного промышленного агрегата.

Наличие двух связей с грунтом и его двоякая роль приводят к необходимости рассмотреть параметры трактора, орудия и грунта в их единстве и взаимодействии.

К параметрам трактора, определяющим эффективность агрегата относятся: базовые (конструктивные) параметры, характеризующие его конструкцию (масса - M , длина опорной поверхности гусениц (база) - L , колея (поперечная база) - B , удельное давление на грунт - q_T , координаты центра масс - $h_{Ц}$); параметры тяговой характеристики, характеризующие тягово-мощностные свойства трактора (тяговые усилия - P_1 ; скорости - V_j ; мощность двигателя - N ; диапазоны силового - D_ϕ и скоростного D_v регулирования силовой установки. К параметрам орудия, определяющим эффективность агрегата, относятся размеры, определяющие его емкость (объем перемещаемого грунта - q_T). Применительно к бульдозеру, например, такими размерами являются длина - B_6 и высота - H .

Из теории трактора известно, что базовые параметры однозначно определяют тягово-сцепные и мощностные свойства трактора. Оставляя в стороне проблему их оптимизации, рассмотрим проблемы, возникающие при оптимизации параметров тяговой характеристики.

При оптимизации параметров тяговой характеристики возникают проблемы определения уровня мощности, диапазона оптимальных значений тяговых усилий, разбивки ряда передач, определения величин транспортных скоростей, коэффициента приспособляемости двигателя и др. Самостоятельное значение здесь имеет проблема критериев оптимальности.

Применительно к трактору сельскохозяйственного назначения эти задачи, в основном, решены.

С развитием промышленного тракторостроения стала развиваться и теория промышленного трактора. Однако, в вопросах исследования тяговой характеристики сохранены основные принципы, положенные в основу теории сельскохозяйственного трактора [1].

Выработанные к настоящему времени общей теорией трактора, принципы построения тяговых характеристик исходят из нигде не определяемого понятия оптимального рабочего процесса как движения с постоянной скоростью или с постоянным тяговым усилием, которое в дальнейшем будем называть стационарным процессом.

Однако такой подход не подтверждается практикой применения автоматических трансмиссий и более того, приводит, как это будет показано ниже, к отрицанию таких трансмиссий при условии создания хорошо работающих автоматических систем управления.

Это же представление о стационарном оптимальном процессе применяется также при построении автоматизированных систем управления транспортными агрегатами; работы эти ведутся, по крайней мере в нашей стране, с начала 50-х годов.

Априорно неверное представление об оптимальном движении главного машинного контура даже при совершенной системе управления не приводит к существенным результатам, по крайней мере, промышленного внедрения такие системы не получили.

Рассмотрим теперь рабочие процессы землеройно-транспортных тракторных агрегатов и связанные с ними задачи.

Основной предпосылкой в исследованиях сельскохозяйственных тракторов, как указывалось выше, является предположение об оптимальном рабочем процессе как движении с постоянной скоростью и задача в том или ином виде сводится к поиску экстремума функции одного или нескольких переменных, в роли которых выступают обычно тяговые усилия.

Такая посылка и, соответственно, решение задачи для промышленных тракторов является недостаточной ввиду существенно меняющихся тяговых сопротивлений и переменной структуры рабочих циклов. Иначе говоря, нужно выработать стратегию

оптимального поведения в каждом из этих циклов, т.е. найти закон движения агрегата, при котором его эффективность будет наибольшей.

Закон движения агрегата, при котором достигается его максимальная производительность, назовем оптимальным рабочим процессом. Установление и изучение свойств и параметров таких процессов позволяет установить параметры трактора их обеспечивающие.

Производительность Π землеройно-транспортного агрегата, работающего циклическим способом, записывается выражением

$$\Pi = \sum_i q_i / \sum_i T_i, \quad i = 1, \dots, n \quad (1)$$

где q_i - объем грунта, перемещаемый за i -ый цикл; T_i - время i -го цикла; n - количество циклов.

Транспортные и холостые ходы агрегата выполняются при заданном объеме перемещаемого грунта и, совершенно очевидно, движение в этих случаях должно осуществляться на максимально возможной скорости, допускаемой условиями передвижения и мощностью двигателя. Что касается хода копания, то здесь требуется оптимально, в каком-то смысле, управлять режимом движения. Задача состоит, таким образом, в том, чтобы оптимизировать рабочий ход и затем из этих рабочих ходов выбрать тот, который доставляет максимум функционалу Π .

Оптимальный рабочий процесс агрегата определяется свойствами мощностного баланса трактора, закономерностями копания грунта рабочим орудием и типом характеристики силовой установки.

Мощностной баланс трактора обладает одним важным свойством [4], устанавливаемым следующей теоремой.

Теорема 1. Если коэффициент полезного действия механической (редукторной) части трансмиссии η_M и коэффициент сопротивления движению f постоянны, а буксование есть вогнутая функция тягового усилия $\delta = \delta(\varphi)$, тяговый КПД трактора \hat{h}_0 является выпуклой функцией скорости.

Сопротивление копанию рабочим орудием φ_T описывается двучленом относительно площади вырезаемой стружки F_T и объема грунта в призме волочения q_T .

$$j_0 = kF_0 + m_{\mu}q_0 \quad (2)$$

где k , m_{μ} - коэффициенты пропорциональности, принимающие постоянные или переменные значения специального вида:

$$k = k_1 + k_0/F_0 \quad (3)$$

где k_1 , k_0 - константы, зависящие от свойств грунта и состояния ножа, а коэффициент m_{μ} возрастает с ростом q_T и аппроксимируется ломаной, составленной из двух отрезков с точностью, достаточной для практических расчетов [4].

Прогрессивные характеристики силовых установок тракторов в достаточно широком диапазоне частоты выходного вала отклоняются от постоянного значения (идеальная характеристика) на 0,5-2 % [4].

Для дальнейшего принято:

- тяговый КПД трактора является выпуклой функцией скорости и удовлетворяет условиям на границе $\hat{h}_0(0) = \hat{h}_0(v_{\max}) = 0$;
- тяговый баланс бульдозера описывается уравнением (2) с постоянными или переменными коэффициентами k , m_{μ} ;
- силовые установки имеют либо идеальную характеристику, либо постоянную частоту вращения выходного вала.

Состояние агрегата в процессе копания в любой момент времени характеризуют пять параметров: пройденный путь x , скорость движения $V = \dot{x}$, тяговое усилие φ , площадь сечения вырезаемой стружки F , объем грунта в призме волочения - q^* .

Параметры V , φ , F являются управляющими, в результате изменения которых меняются величины x , q .

Между тремя управляющими параметрами существуют два уравнения связи: уравнения копания (2) и мощностного баланса

$$j V = h_0(V) \quad (3)$$

Объем грунта, набираемый на перемещении dx равен $dq = Fdx$.

Учитывая уравнения связи, получим математическую модель процесса копания:

$$\dot{q}(t) + \frac{1}{k} m_d \dot{x}(t) q(t) = \frac{1}{k} h_0(\dot{x}) \quad (4)$$

Задача оптимального процесса формулируется в следующем виде: среди всех возможных движений найти такое, которое за данное время T на длине копания L обеспечивает набор призмы грунта максимального объема.

В силу условия взаимности эта задача эквивалентна задаче о быстрейшем: среди всех возможных движений найти такое, которое на заданной длине копания обеспечивает набор заданного объема грунта за минимальное время.

В практике тракторостроения существует два типа трансмиссий: ступенчатые (переключаемые и непереклюаемые) и бесступенчатые (автоматические и неавтоматические), для которых тоже может применяться дополнительное переключение, если диапазон бесступенчатого регулирования меньше рабочего диапазона скоростей или тяговых усилий. Соответственно типам трансмиссий нужно рассмотреть непрерывное и дискретное управление агрегатом.

При непрерывном управлении задача решается методом классического вариационного исчисления. На самом деле решение уравнения (4) при граничных условиях:

$$t_0 = 0; x(0) = 0; q(0) = q_0; t_1 = T; x(T) = L; q(T) = q,$$

дается формулой

$$q = \exp\left(-\frac{m_d L}{k}\right) \left[q_0 + \frac{1}{k} \int_0^T h(\dot{x}) \exp\left(-\frac{m_d x}{k}\right) dt \right] \quad (5)$$

Сформулированная задача решается максимизацией функционала

$$q = \int_0^T h(\dot{x}) \exp(m x) dt, \quad 0 \leq \dot{x} \leq \dot{x}_{\max} \quad (6)$$

где $m = m_d/k$, $h(\dot{x}) = h_0(\dot{x})/k$

Экстремали, доставляющие необходимые условия максимума функционала q удовлетворяют уравнению Эйлера

$$h_{\ddot{x}\dot{x}} + m h_{\dot{x}x} - m h = 0 \quad (7)$$

которое и представляет собой математическую модель оптимального процесса при непрерывном управлении. Достаточные условия оптимальности обосновываются следующей теоремой.

Теорема 2. Для любой выпуклой функции $h(\dot{x})$ на экстремали, удовлетворяющей уравнению (7), достигается максимум функционала (6).

* здесь и в дальнейшем η_T , φ , F , q , N отнесены к единице веса агрегата

Доказательство основано на проверке выполнимости условий Лежандра и Якоби. Важные свойства оптимальных процессов описываются следующими теоремами.

Теорема 3. Оптимальный процесс не зависит от начального объема набранной призмы.

Теорема 4. Ни одно движение с постоянной скоростью не является оптимальным.

Доказательство третьей теоремы основано на единстве экстремалей функционалов (5) и (6). Для доказательства четвертой можно показать, что в оптимальном процессе всегда $\ddot{x} < 0$.

Для некоторых типичных процессов, соответствующих характеру работы специальных орудий, либо отвечающих определенному закону протекания кривой мощностного баланса, функционал (6) вырождается и приобретает специальный вид, которому соответствует специальный характер оптимального процесса. Важнейший из них $\mu = Q = 0$. Этот случай интерпретируется отсутствием накопления призмы грунта (плуг, рыхлитель, фреза и т.д.). Оптимальным в этом случае является процесс с постоянной скоростью (стационарный процесс). Такие процессы характерны, в основном для сельскохозяйственных агрегатов и отличают их принципиально от промышленных.

Таким образом по структуре оптимальных процессов все тракторные агрегаты делятся на две группы:

- агрегаты, работающие без накопления грунта (плуги, рыхлители, каналокопатели и др.), для которых оптимальные процессы реализуются в классе линейных функций (стационарные процессы с постоянной скоростью);

- агрегаты, работающие с накоплением грунта (бульдозеры, скреперы и др.), для которых оптимальные процессы реализуются в классе разрывных функций и стационарные процессы не являются оптимальными.

Большой методический интерес представляет сравнение процессов оптимальных по производительности и по средней за рабочий цикл тяговой мощности. Дело в том, что к настоящему времени выработались научные направления в теории промышленного трактора и дорожно-строительных машин, основанные на представлении об эквивалентности критериев "производительность" и "средняя мощность", связанные прежде всего с методами построения тяговой характеристики трактора и автоматизации тракторных землеройно - транспортных агрегатов [1]. Считается, что поддержание максимальной тяговой мощности за счет стабилизации какого-либо параметра, например, частоты вращения вала двигателя, буксования и т.д., обеспечивает агрегату максимальную производительность.

Средняя мощность агрегата определяется функционалом

$$N = \frac{1}{T} \int_0^T h(\dot{x}) dt \quad (8)$$

Экстремали этого функционала удовлетворяют уравнению Эйлера $h_{\ddot{x}} \ddot{x} = 0$, откуда следует $\dot{x} = const$, т.е. максимум средней мощности достигается при постоянной скорости движения агрегата.

Отсюда следует, что процессы оптимальные по мощности и производительности совпадают для агрегатов, работающих без накопления грунта (плуг, борона, фреза и т.д.). Для агрегатов, накапливающих грунт в процессе его разработки (бульдозер, скрепер и др.), критерии "производительность" и "средняя мощность" неэквивалентны и оптимальные процессы по эти критериям принципиально различны.

Таким образом, для агрегатов, работающих без накопления грунта, справедливы все выводы и рекомендации общей теории трактора.

Здесь следует отметить, что создание систем управления, обеспечивающих экстремальные значения неверно выбранным критериям, приводит к отрицанию таких прогрессивных трансмиссий как гидромеханические, электромеханические, гидростатические и т.д., т.к. стабилизация режимов их работы лишает их главного преимущества - возможность реализации оптимального процесса и приводит к худшим

технико-экономическим показателям агрегата за счет меньшего КПД по сравнению с механическими ступенчатыми трансмиссиями.

В том случае, когда трактор оборудован механической ступенчатой переключаемой трансмиссией со стабилизацией режимов, решение ищется на множестве кусочно-линейных функций, для непереключаемых трансмиссий - на множестве линейных функций (постоянных скоростей). Задача управления формулируется следующим образом: среди всех возможных управлений на множестве кусочно-линейных функций за данное время набрать наибольший объем призмы на заданной длине при заданном числе переключений.

Эта задача решается методом динамического программирования.

Введем обозначения: t_i , φ_i , v_i , L_i - время, тяговое усилие, скорость, длина - на i -ом участке хода копания.

Обозначим также q_i - объем грунта, набираемый на i -ом участке; Q_i , Q_{mi} - объем и максимальный объем грунта, набираемый на i участках; L_i , T_i - путь и время i шагового процесса.

Функциональное уравнение Беллмана имеет вид:

$$Q_{mn} = \max [q_i + \max Q_{n-i}(L_{n-i}, T_{n-i})] \quad (9)$$

$$0 < \dot{x} \leq \dot{x}_{\max}, \quad 0 < t_i \leq T_n, \quad 0 < L_i \leq L_n, \quad i = 1, \dots, n$$

При механической ступенчатой непереключаемой трансмиссии задача сводится к поиску экстремума функции одного переменного

$$K'_i = \frac{(j - a/2)V_x}{1 + (j + f)V_x / 102 N_y h_m (1 - d)} \quad (10)$$

где φ , f , δ - тяговое усилие, усилие сопротивления движению, буксование; V_x , N_y - скорость холостого хода, мощность; α - угол отсыпки кавальера.

Распространение результатов на общий случай сопротивления копанию оправдывается теоремой 3.

Имея решение задачи копания можно построить оптимальные рабочие процессы в целом.

Рассмотрим работу бульдозера в длинной траншее с отсыпкой грунта в кавальер. Стратегия оптимальной разработки такой траншеи определяется изменяющейся длиной транспортировки и величиной угла отсыпки, а также различием структуры цикла в зависимости от емкости отвала бульдозера.

В зависимости от емкости отвала бульдозера можно различить два вида технологии: - агрегат с отвалом малой емкости, позволяющий транспортировать весь объем грунта по кавальеру при любом угле. В этом случае набирается одинаковый объем грунта за каждый цикл; - агрегат с отвалом большой емкости. В этом случае набирается различный объем грунта при каждом рабочем ходе, соответствующий углу наклона кавальера.

Решение задачи оптимальных процессов позволяет найти оптимальные параметры агрегата, оценить эффективность ряда конструктивных решений и установить, что: - оптимальные по производительности и КПД тяговые усилия промышленного трактора при непереключаемой ступенчатой трансмиссии существенно отличаются, тогда как для сельскохозяйственного, они практически не различимы; - верхняя граница оптимальных значений тяговых усилий промышленных гусеничных тракторов в 1,5-2 раза превышает рекомендуемые общей теорией. Оптимальные ряды передаточных чисел из 4-х передач с механической трансмиссией и 2-х - с гидромеханической обеспечивают не ниже 99% максимальной производительности агрегата; - производительность как функция параметров таких как мощность двигателя, скорость холостого хода и некоторых других, является монотонной и экстремумов не имеет. - для промышленного трактора реализация мощности в тяговое усилие, или, иначе говоря, силовое

форсирование значительно эффективнее, чем скоростное, которое считается основным направлением для трактора сельскохозяйственного назначения.

Поскольку исследование велось в процессе непосредственного конструирования, доводки и испытания машин, они получили серьезную экспериментальную проверку и непосредственное внедрение в параметрах серийных и опытных машин ЧТЗ, ЧЗК, ЧЗПТ, БЗСЗМ, ЛКЗ и др. За счет изменения параметров тяговой характеристики и рабочего орудия удалось поднять производительность до 20%, а в совокупности с улучшением базовых параметров до 30% без увеличения мощности двигателя, при существенном снижении расхода топлива, силовой и тепловой нагруженности моторно-трансмиссионной установки. Новые научные положения получили развитие в трудах ЧФНАТИ (ГОСНИИПТ), НИИОГР, ЧГТУ, СИБАДИ, УРАЛНИИС.

Литература

1. Гинзбург Ю.В., Швед А.И., Парфенов А.П. Промышленные тракторы. М.: Машиностроение, 1986, с.293.
2. Гуськов В.В. Оптимальные параметры сельскохозяйственных тракторов. М.: Машиностроение, 1966, с.195.
3. Львов Е.Д. Теория трактора. М.: Машгиз, 1960, с.252.
4. Позин Б.М. Основы теории тяговой характеристики промышленного гусеничного трактора. Депон.рук.ЦНИИТЭИ тракторосельмаш, N524, 1985, с.150.
5. Позин Б.М. Вопросы оптимизации параметров промышленных гусеничных тракторов (общая постановка, отношение критериев). Депон.рук.ЦНИИТЭИ сельхозмаш, N1409, 1991, с.13.
6. Трепененков И.И. Эксплуатационные показатели сельскохозяйственных тракторов. М.: Машгиз, 1963, с.271.