

СОВМЕЩЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ И ЭЛЕКТРОТРАНСМИССИИ ПРОМЫШЛЕННОГО ТРАКТОРА

С.В. Кондаков, А.Е. Новосельский

COMBINATION OF THE INTERNAL COMBUSTION ENGINE CHARACTERISTICS AND THE ELECTRIC TRANSMISSIONS OF AN INDUSTRIAL TRACTOR

S. V. Kondakov, A.E. Novoselsky

Предлагается методика совмещения характеристик двигателя внутреннего сгорания и электрической трансмиссии постоянного тока промышленного дизель-электрического трактора, обеспечивающая получение максимальной производительности дорожно-строительного агрегата на базе этого трактора.

Ключевые слова: Промышленный трактор, дорожно-строительный агрегат, электрическая трансмиссия, двигатель внутреннего сгорания, производительность, скоростная характеристика, передаточное число.

The combination system of the internal combustion engine characteristics and the electric transmission of direct current of an industrial diesel-electric tractor providing production of the maximum capacity of the road-building unit on the basis of this tractor is offered.

Keywords: industrial tractor, road-building unit, electric transmission, internal combustion engine, capacity, speed ability, gear-ratio.

Условия работы промышленных тракторов, как базы дорожно-строительных агрегатов, характеризуются: резким изменением внешних нагрузок, требующих соответствующих изменений тяговых усилий и скоростей движения; цикличностью технологического процесса, особенностью которого является чередование в каждом цикле рабочих ходов с холостыми откатами; повышенным динамическим режимом и вибрацией, особенно при работе на тяжелых и мерзлых грунтах; эксплуатацией в разнообразных климатических условиях, в частности при особо низких температурах.

Указанные особенности условий работы промышленного трактора показывают, что для него особенно важное значение приобретают возможность автоматического регулирования тяговых усилий и скоростей движений в широком диапазоне, возможность легкого и простого управления моторно-трансмиссионной установкой [1, 2]. Это достигается применением прогрессивных электрических трансмиссий (ЭТ), осуществляющих относительную стабилизацию режима двигателя внутреннего сгорания (ДВС) на номинальной мощности и непрерывное изменение тягового усилия и скорости движения трактора в широких пределах. Тракторный агрегат приспособляется к действующим на него внешним нагрузкам, при этом обеспечивается высокая степень использования мощности ДВС.

На промышленном тракторе с ЭТ труд водителя значительно облегчается за счет устранения его от процесса управления режимами работы трансмиссии при изменении нагрузки и исключения случаев перегрузки и заглохания ДВС.

Обобщенным техническим критерием оценки эффективности промышленного трактора, как базы дорожно-строительного агрегата, является его эксплуатационная производительность [1]. Известно, что указанный критерий есть функция трех групп показателей: технической производительности, надежности и организационных факторов. В процессе проектирования конструктор непосредственно влияет на первые две независимые друг от друга группы показателей, причем техническая производительность трактора напрямую зависит от правильного выбора его основ-

ных параметров. Приведенные удельные затраты, определяемые эксплуатационной производительностью, помимо первых двух групп показателей, определяются организационными факторами, воздействие на которые конструктором ограничено. Таким образом, за частный критерий оценки эффективности промышленного трактора, определяемый проектировщиком, может быть принята его техническая производительность.

Тягово-скоростные показатели характеризуют потребительские свойства промышленного трактора и наряду с другими эксплуатационными показателями влияют на техническую производительность агрегата на базе этого трактора. В связи с модернизацией промышленного дизель-электрического трактора ДЭТ-250М2 производства ООО «Челябинский тракторный завод - УРАЛТРАК», разработкой и выпуском новой модели трактора - ДЭТ-320 с установкой на него более мощного дизельного двигателя ЯМЗ-7511.10-18 производства ОАО «АВТОДИЗЕЛЬ» возникают предпосылки повышения тягово-скоростных показателей этих тракторов путем рационального совмещения характеристик ДВС и ЭТ. Основным способом повышения технической производительности землеройного агрегата авторами предлагается внесение изменений именно в параметры моторно-трансмиссионной установки трактора, к которым относится выходная характеристика моторно-трансмиссионного блока, обуславливаемая номинальной мощностью ДВС, характеристикой бесступенчатой трансформаторной установки (силовой генератор - тяговый электродвигатель) и способом совмещения трансформирующего блока и приводного двигателя. Все остальные характеристики, такие как конструкция и параметры рабочего оборудования, вес трактора и агрегата на его базе, тип движителя, вид и состояние грунта и т. д., влияющие на тягово-скоростные показатели, остаются неизменными. В этом случае за частный критерий оценки эффективности землеройного агрегата на базе промышленного дизель-электрического трактора может быть принят удельный показатель - коэффициент производительности $k_{\text{п}}$, зависящий, при прочих равных условиях, только от параметров трактора и определяющий производительность тракторного агрегата [4].

С этих позиций авторами разработана методика рационального совмещения характеристик ДВС и ЭТ промышленного дизель-электрического трактора, направленная на достижение максимальной производительности дорожно-строительного агрегата на базе этого трактора и обеспечение максимального значения средней выходной мощности моторно-трансмиссионной установки.

Рассмотрим результаты применения методики при совмещении характеристик двигателей В-31М2 и ЯМЗ-7511.10-18, используемых на промышленных дизель-электрических тракторах, с нагружающими характеристиками ЭТ этих тракторов.

ДВС и ЭТ постоянного тока по системе генератор-электродвигатель, соединенные в единый рабочий агрегат, образуют силовую установку промышленного трактора (рис. 1).

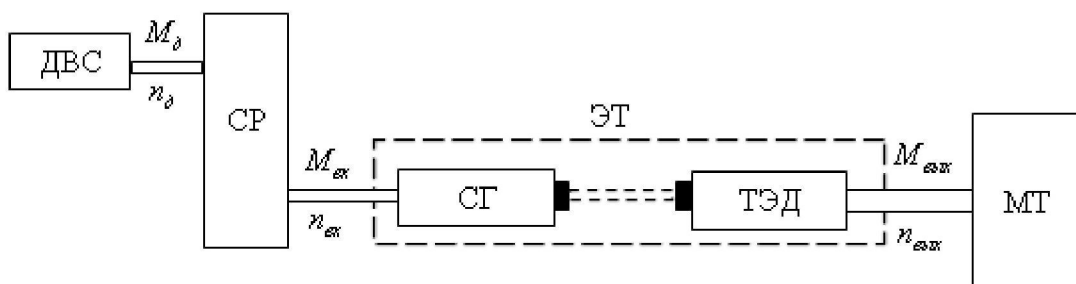


Рис. 1. Силовая установка промышленного трактора

Для получения различных точек совместной работы двигателя В-31М2 и ЭТ выбирается ряд передаточных отношений повышающего согласующего редуктора привода силового генератора в пределах $0,6 \leq i_{cp} \leq 0,707$ с учетом к.п.д. согласующего редуктора $\eta_{cp} = 0,99$ (пара косозубых цилиндрических шестерен). Для каждого передаточного отношения согласующего редуктора строится график совместной работы двигателя и ЭТ. Для примера на рис. 2 представлен график совместной работы двигателя В-31М2 и ЭТ с согласующим редуктором, передаточное отношение которого $i_{cp} = 0,707$.

После нахождения координат точек совместной работы ДВС и ЭТ известным способом [2] определяется выходная характеристика силовой установки трактора в виде зависимости крутящего момента на выходе ЭТ от частоты вращения выходного вала $M_{\text{вых}} = \varphi(n_{\text{вых}})$.

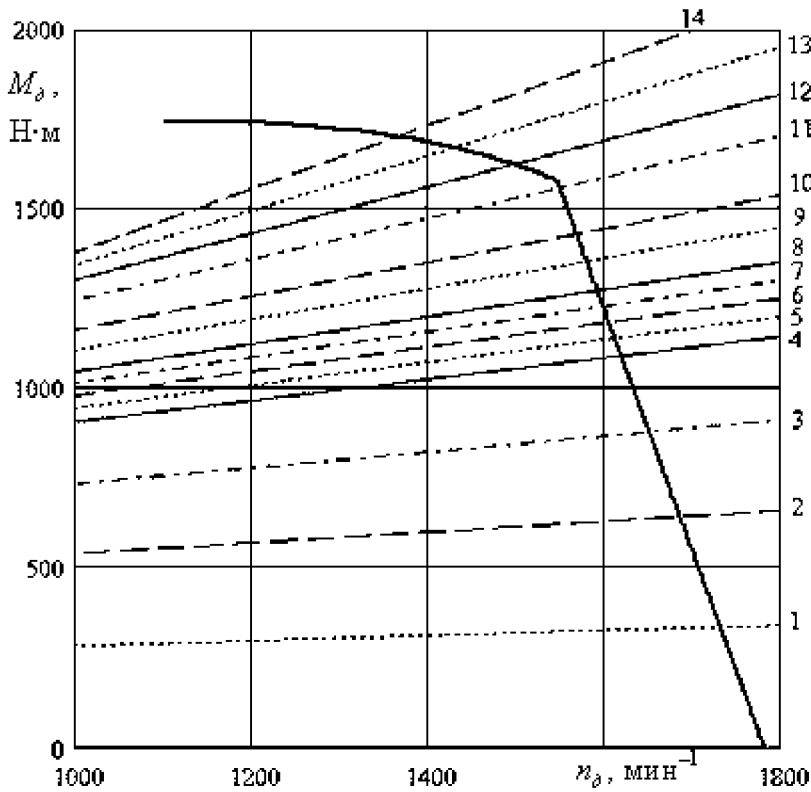


Рис. 2. График совместной работы двигателя В-31М2 и ЭТ с согласующим редуктором $i_{cp} = 0,707$

В ходе лабораторно-полевых испытаний [3] при выполнении трактором бульдозерных работ по разработке траншей в суглинистом грунте II-III категорий плотности на рабочем режиме (I передача) получен статистический ряд значений частоты вращения выходного вала ЭТ и построена его графическая интерпретация - гистограмма плотности распределения f частоты вращения тягового электродвигателя (рис. 3).

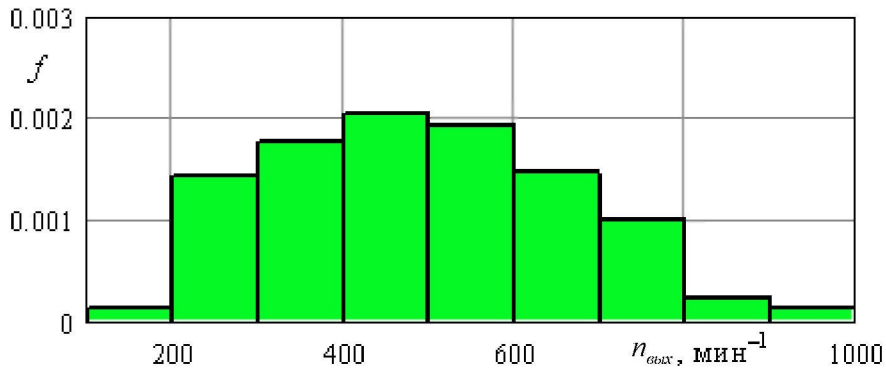


Рис. 3. Плотность распределения f частоты вращения тягового электродвигателя

Для определения аппроксимирующего закона распределения частоты вращения тягового электродвигателя (выравнивания статистического ряда) по экспериментальным данным определены начальный и четыре центральных момента, описывающих свойства распределения случайной величины. Проверка нулевой гипотезы (соответствия аппроксимирующей кривой и полученного эмпирического распределения) проводилась при помощи критерия согласия Пирсона χ^2 . В ходе сглаживания статистических данных распределения случайной величины установлено, что частота вращения вала тягового электродвигателя распределена по одномодальному асимметричному закону, описываемому двумя числовыми характеристиками: математическим ожидани-

ем $\bar{n}_{\text{вых}} = 486 \text{ мин}^{-1}$ и средним квадратическим отклонением $\sigma = 158,4 \text{ мин}^{-1}$. После определения выходной характеристики силовой установки трактора и плотности распределения вероятности частоты вращения вала тягового электродвигателя $\varphi(n_{\text{вых}})$ определяется средняя мощность на выходном валу ЭТ:

$$\bar{N}_{\text{вых}} = \int_{n_{\text{вых}}^{\min}}^{n_{\text{вых}}^{\max}} [M_{\text{вых}} = \varphi(n_{\text{вых}})] \cdot f(n_{\text{вых}}) \cdot dn_{\text{вых}},$$

где $n_{\text{вых}}^{\max}$, $n_{\text{вых}}^{\min}$, – соответственно, максимальная и минимальная расчетные частоты вращения выходного вала ЭТ трактора, мин^{-1} .

Рассчитанные подобным образом значения средних мощностей на выходном элементе ЭТ для всего диапазона передаточных отношений согласующего редуктора привода силового генератора приведены в табл. 1 и на рис. 4. Совокупность найденных решений аппроксимирована квадратической параболой $\bar{N}(i_{cp}) = a \cdot i_{cp}^2 + b \cdot i_{cp} + c$, где $a = -2,686 \cdot 10^3$, $b = -3,414 \cdot 10^3$, $c = -888,84$.

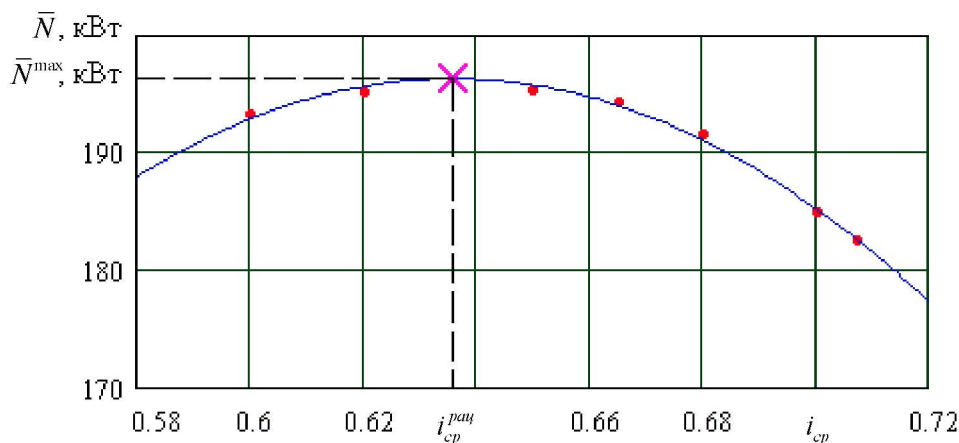


Рис. 4. Зависимость средней мощности на выходном элементе ЭТ от передаточного отношения согласующего редуктора

Таблица 1

Зависимость средней выходной мощности ЭТ от передаточного отношения согласующего редуктора

$i_{\text{ред}}$	0,600	0,620	0,650	0,665	0,680	0,700	0,707
\bar{N} , кВт	193,2	195,2	195,3	194,3	191,6	184,9	182,5

Методом квадратичного программирования, когда целевая функция квадратична, а ограничения – линейные равенства и неравенства ($0,6 \leq i_{cp} \leq 0,707$), определено максимальное значение средней выходной мощности ЭТ, которая для электропривода трактора с дизелем В-31М2 $\bar{N}^{\max} = 196 \text{ кВт}$ обеспечивается при установке в силовую передачу согласующего редуктора привода силового генератора с передаточным отношением $i_{cp}^{\text{opt}} = 0,636$.

Рациональное совмещение характеристик двигателей ЯМЗ-7511.10-18 с перенастроенной на ООО «ЧТЗ-УРАЛТРАК» топливной аппаратурой и без регулировок топливного насоса двигателя с нагружающими характеристиками ЭТ проведено аналогичным образом. Полученные результаты сведены в табл. 2.

Полученный запас выходной мощности ЭТ реализован в тяговую мощность землеройного агрегата при оптимальных расчетных значениях тяговых усилий трактора, обеспечивающих его максимальную техническую производительность.

Для оценки тягово-скоростных качеств промышленных дизель-электрических тракторов с рационально совмещенными характеристиками ДВС и ЭТ построены их тяговые характеристики, определен коэффициент производительности k_n тракторного агрегата в каждой точке выходной

Расчет и конструирование

характеристики моторно-трансмиссионной установки трактора. Его зависимость от развиваемого удельного крюкового тягового усилия определяется выражением:

$$k_n = \frac{\varphi_{кр} \cdot V_{xx}}{1 + \frac{(\varphi_{кр} + f_a) \cdot V_{xx}}{\frac{N_T}{G_a} \cdot \eta_M \cdot c_p \cdot (1 - \delta)}},$$

где $\varphi_{кр}$ – удельное крюковое тяговое усилие тракторного агрегата; V_{xx} – скорость холостого хода; N_T – тяговая мощность; G_a – вес; f_a – коэффициент сопротивления движению; η_M – механический к.п.д. силовой передачи и гусеничного зацепления; c_p – коэффициент потери скорости рабочего хода; δ – буксование гусеничного движителя.

Таблица 2

Результаты рационального совмещения характеристик ДВС и ЭТ промышленных дизель-электрических тракторов ДЭТ-250М2 и ДЭТ-320

Параметры совмещения	Трактор ДЭТ-250М2 с двигателем В-31М2		Трактор ДЭТ-320 с двигателем ЯМЗ-7511.10-18 (с перенастроенной топливной аппаратурой)		Трактор ДЭТ-320 с двигателем ЯМЗ-7511.10-18	
	i_{cp}	\bar{N}_{max} , кВт	i_{cp}	\bar{N}_{max} , кВт	i_{cp}	\bar{N}_{max} , кВт
Существующие	0,707	182,5	0,806	170,4	0,806	207,4
Расчетные	0,636	196,0	0,690	199,0	0,734	214,0

После этого определен максимум полученной функциональной зависимости $k_n(\varphi_{кр})$, и искоемое удельное тяговое усилие, обеспечивающее максимальную производительность тракторному агрегату.

Изменяя передаточное число механической части трансмиссии i_{mpl} на рабочей передаче в достаточно широком диапазоне ($i_{mpl}=20\dots90$), для каждого его значения определен максимальный коэффициент производительности и соответствующее ему удельное тяговое усилие.

По полученным данным сделан вывод о том, что для промышленного дизель-электрического трактора с ЭТ существуют оптимальные расчетные тяговые усилия (передаточные числа механической части трансмиссии), обеспечивающие максимальную производительность землеройному агрегату, и достаточно широкая область расчетных удельных тяговых усилий $\varphi_{кр,расч}$, внутри которой производительность практически не меняется. После изменения передаточного числа механической части трансмиссии со значения $i_{mpl} = 33,273$ на $i_{mpl} = 50$ можно ожидать повышение коэффициента производительности землеройного агрегата на базе трактора ДЭТ-250М2 с рационально совмещенными характеристиками ДВС и ЭТ на 8 % по сравнению с существующей конструкцией.

Аналогичным образом проведен выбор удельных тяговых усилий, обеспечивающих максимум технической производительности бульдозерно-рыхлительному агрегату на базе трактора ДЭТ-320 с дизельным двигателем ЯМЗ-7511.10-18.

Таким образом, для совершенствования конструктивных параметров моторно-трансмиссионной установки промышленного дизель-электрического трактора, авторы рекомендуют следующее:

1. Установить на трактор ДЭТ-250М2 согласующий редуктор привода силового генератора с передаточным отношением $i_{cp} = 0,636$. Это позволит получить значение средней выходной мощности моторно-трансмиссионной установки $\bar{N}_{вых} = 196$ кВт, что на 7,4 % больше этого же показателя существующей конструкции трактора, а реализация этого запаса мощности в тяговую мощность с повышением удельного тягового усилия (передаточного числа механической части трансмиссии) ведет к росту производительности землеройного агрегата на 8 %.

2. Модернизировать промышленный дизель-электрический трактор ДЭТ-320 путем применения дизельного двигателя ЯМЗ-7511.10-18 и рационального совмещения его характеристик с нагружающими характеристиками ЭТ, что позволит повысить среднюю выходную мощность моторно-трансмиссионной установки на 17,3 % по сравнению с существующей конструкцией моторно-трансмиссионной установки трактора ДЭТ-250М2, а реализация этого запаса мощности в тяговую мощность с повышением удельного тягового усилия приведет к увеличению производительности землеройного агрегата на 14 %.

Литература

1. Гинзбург, Ю.В. Промышленные тракторы/Ю.В. Гинзбург. - М.: Машиностроение, 1986. - 296 с.
2. Исаков, П.П. Электромеханические трансмиссии гусеничных тракторов /П.П. Исаков. - Л.: Машиностроение, 1981. - 302 с.
3. Бондарь, В.Н. Испытания бульдозерно-рыхлительного агрегата на базе трактора ДЭТ-320 /В.Н. Бондарь, Г.П. Мицын, А.Е. Новосельский // Строительные и дорожные машины, 2005. -№11. -С. 12-15.
4. Позин, Б.М. Вопросы методологии в теории тяговой характеристики трактора: монография /Б.М. Позин. - Челябинск: Изд-во ЧГАУ, 2006. - 123 с.

Поступила в редакцию 18 апреля 2008 г.

Кондаков Сергей Владимирович. Кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Специальные и дорожно-строительные машины» Южно-Уральского государственного университета. Область научных интересов - теория движения, бесступенчатые передачи военных гусеничных машин.

Kondakov Sergey Vladimirovich. Cand. Sc. (Engineering), Associate Professor, Professor of the Special and Road-Building Machines Department of the South Ural State University. Professional interests: theory of movement, continuous variable transmission of military caterpillar vehicles.

Новосельский Алексей Евгеньевич. Ассистент кафедры «Специальные и дорожно-строительные машины» Южно-Уральского государственного университета, научный сотрудник открытого акционерного общества «Научно-исследовательский институт автотракторной техники» (ОАО «НИИ АТТ»). Область научных интересов - силовые установки промышленных тракторов, бесступенчатые передачи автотракторной техники.

Novoselsky Aleksey Evgenievich. Assistant of the Special and Road-Building Machines Department of the South Ural State University, Scientific Researcher of the open joint-stock company Scientific Research Institute of Automotive Engineering (OAO «Nauchno-Issledovatel'skiy Institut Avtotraktornoy Tekhniki» (OAO «Nil АТТ»)). Professional interests: power plants of industrial tractors, continuous variable transmission of automotive engineering.