

УДК 629.366

Электрическая тяга и электроотбор мощности с.-х. трактора

Д-р техн. наук П. А. АМЕЛЬЧЕНКО, инж-ры И. Н. ЖУКОВСКИЙ (ОИМ НАН Беларуси),
А. Г. СТАСИЛЕВИЧ, А. В. КЛЮЧНИКОВ, А. И. ЖУКОВСКИЙ (ОАО "МТЗ", zhuk93@mail.ru)

Аннотация. Рассмотрены применение и эффективность электрической тяги и электроотбора мощности на с.-х. тракторах.

Ключевые слова: трактор, электрическая тяга, электрический отбор мощности, мотор-генератор, тяговый двигатель, механическая характеристика, буксование, тяговая характеристика.

Основным источником тяги на современных с.-х. тракторах остается механический силовой поток дизельного двигателя. Тяговая сила движителей тракторов формируется переданным трансмиссией крутящим моментом дизеля с учетом ограничений, накладываемых сцепными свойствами движителей и опорной поверхности почвы или дороги.

Длительное (более 100 лет) использование на тракторах двигателей внутреннего сгорания (ДВС) привело к загрязнению почвы вредными компонентами отработавших газов (ОГ) до такой степени, что возникла потребность их ограничения и контроля в зонах мировых рынков сбыта тракторов, в т. ч. введения законодательных национальных и межнациональных норм [1, 2]. Однако реализация этих норм не останавливает дальнейшее загрязнение почвы, а лишь замедляет его темп. Вредное воздействие ДВС на окружающую среду сегодня становится весьма серьезной экологической проблемой.

Современные наука и техника пока не располагают эффективными средствами по замене на с.-х. тракторах и машинах двигателей на минеральном топливе агрофильными силовыми установками, но имеют возможность заметно снизить вредное воздействие ДВС на окружающую среду.

Один из возможных путей снижения вредных выбросов ОГ и расхода топлива — исключение дизеля

из скоростного регулирования трактора и перевод дизеля на стационарный скоростной режим работы в зоне минимального расхода топлива. Наилучшим образом это обеспечивается применением в силовой передаче полнопоточной электромеханической передачи по схеме "дизель — электрогенератор — силовой преобразователь электротока — тяговый электродвигатель и электродвигатели отбора мощности — механическая трансмиссия — движители". При этом дизель изолирован от переменного сопротивления движению и нагружается только моментом сопротивления электрогенератора. Тяга движителей формируется не механическим силовым потоком дизеля, а только крутящим моментом тягового двигателя (двигателей). Дизель становится первичным двигателем передвижной индивидуальной электростанции, а трактор в целом приобретает новое свойство — электрическую тягу.

Вторая серьезная предпосылка внедрения электрической тяги и электроотбора мощности на с.-х. тракторах — нарастающая необходимость комплексной автоматизации машинно-тракторных агрегатов (МТА) и мобильных земледельческих технологий. Из опыта промышленного производства известно, что только после перевода промышленности на электроэнергетику и перевода технологического оборудования на электропривод стало возможным осуществить автоматиза-

цию промышленного производства от станков-автоматов до автоматических производств. По аналогии с промышленностью комплексная автоматизация земледелия станет возможна только на основе единой электроэнергетической базы средств и объектов автоматизации и перевода МТА на электрическую тягу и электрический привод активных рабочих органов сельхозмашин.

Под электрической тягой трактора понимается тяга, формируемая силовым потоком тягового электродвигателя в соответствии с его механической характеристикой и сцепными свойствами движителей с опорными поверхностями, как в электроподвижном составе железных дорог и коммунального транспорта.

Тяговая функция трактора значительно шире функций тяги на электроподвижном составе упомянутых транспортных средств. Трактор — в большей степени технологическая машина внедорожного применения с широкими диапазонами изменения коэффициента сопротивления движению $f = 0,02...0,25$ и коэффициента сцепления $\varphi = 0,3...0,8$, частыми чередованиями основного технологического процесса (на гоне) и вспомогательных (на разворотной полосе). Трактор отдает на тяговоприводных операциях до 70 % своей мощности на привод активных рабочих органов сельхозмашин. Большую часть времени он работает на энергоемких почвообрабатывающих опе-

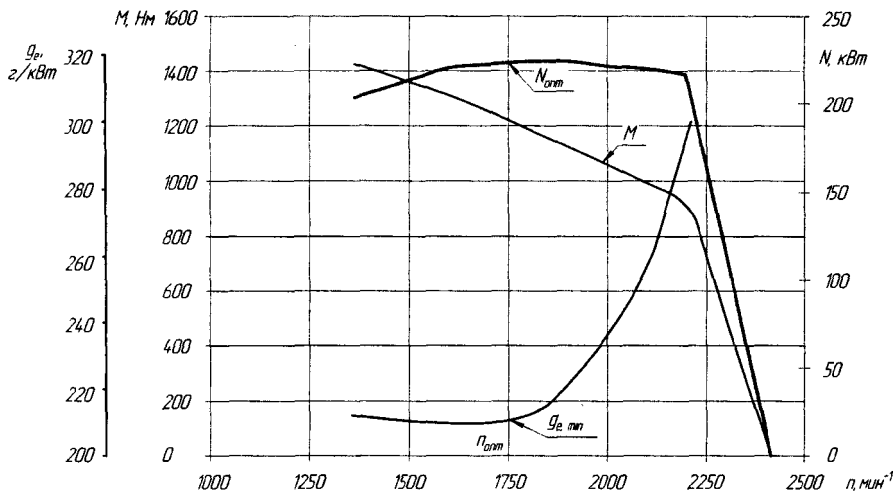


Рис. 1. Скоростная характеристика дизельного двигателя

рациях на скоростях 6—15 км/ч при высоких нагрузках как по тяге, так и по мощности (85—95 % от номинальных значений).

Современный тяговый привод для обеспечения электрической тяги и электроотбора мощности содержит типовой тракторный дизельный двигатель, асинхронный мотор-генератор (АМГ) переменного тока, силовой преобразователь электроэнергии, тяговый асинхронный частотно регулируемый двигатель (ТАД) и систему их управления [3]. Он встраивается в существующую компоновку трактора того же класса с механической трансмиссией, значительно сокращая количество элементов механического ступенчатого и бесступенчатого регулирования (зубчатых колес, валов, зубчатых и фрикционных муфт). При этом силовой поток дизеля формирует только электромагнитный силовой поток генератора и не влияет на качественные характеристики касательной силы тяги движителей.

За номинальную частоту вращения ротора АМГ $n_{амгн}$ принимается оптимальная по удельному расходу топлива частота вращения вала дизеля, при которой на рабочем участке внешней скоростной характеристики удельный расход топлива минимален $g_{e\ min}$, а мощность оптимальна $N_{д\ опт}$ (рис. 1). В настоящее время сложились три основных вида схем тягового электропривода на тягово-транспортных машинах [4].

Мотор-колесная схема содержит одну дизель-электрогенераторную

установку, силовой преобразователь, тяговые электромотор-редукторы в каждом ведущем колесе и систему управления ими. Она применяется на автомобилях БелАЗ [5], самоходных строительных машинах [6], самоходных опрыскивателях [7]. Для расширения диапазона скоростного регулирования применяются мотор-колеса с двухскоростными редукторами [6].

Мотор-колесная схема значительно сокращает механическую часть трансмиссии, оставляя в ней только колесные редукторы. Такая схема позволяет реализовать активный поворот тяговой машины за счет обеспечения разности частот вращения ведущих колес правого и левого бортов, в т. ч. и разворот машины вокруг ее центра масс. Однако эти преимущества практически недостижимы для с.-х. колесных трак-

торов, имеющих диапазон скоростного регулирования от минимальной до максимальной скорости не менее

$$D_V = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} \approx 12 \dots 16. \quad (1)$$

При диапазоне регулирования современных тяговых двигателей $D_{тд} = 2 \dots 2,5$ для реализации скоростного диапазона трактора в колесном редукторе потребуются не две, а три—четыре переключаемые ступени.

У мотор-мостовой схемы, в отличие от предыдущей, применяется один тяговый двигатель на ведущий мост. Она находит применение на гусеничных (ДЭТ-250 [8, 9]) и колесных (Беларус-3023 [3]) тракторах. У последнего один тяговый двигатель приводит как задний, так и передний ведущие мосты. Эта схема позволяет исключить из механической трансмиссии только муфту сцепления и часть коробки передач, не позволяет реализовать активный поворот, сохраняет в гусеничном тракторе бортовые механизмы поворота, а у колесных — межколесные дифференциалы.

Серьезный недостаток этой схемы на тракторах — наличие механического привода заднего вала отбора мощности (ВОМ), что значительно усложняет компоновку трактора из-за необходимости взаимного согласования координат осей ДВС, тягового мотор-генератора, тягового двигателя, ведущих колес и хвостовика ВОМ. При замене механического отбора мощности на электрический взаимное согласование координат осей потребуется только у ди-

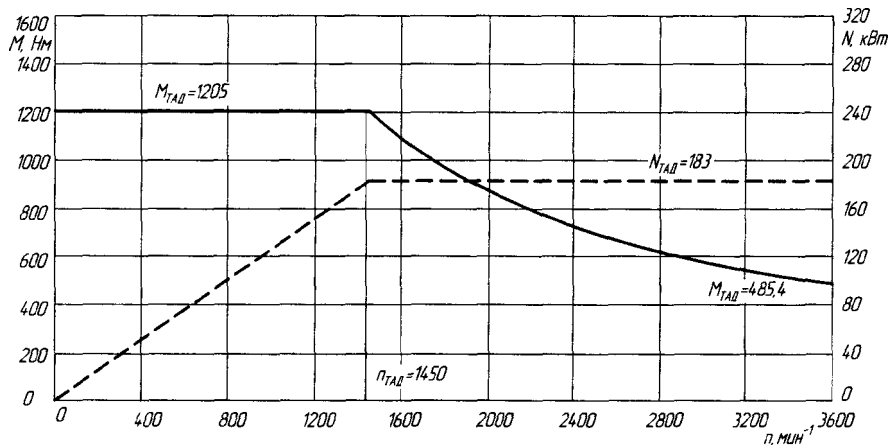


Рис. 2. Механическая характеристика ТАД трактора "Беларус-3023"

зеля с мотор-генератором и тягового двигателя с ведущими колесами (звездочками гусениц).

Мотор-бортовая схема тягового привода предусматривает привод правого и левого бортов отдельными тяговыми двигателями и применяется в основном в гусеничных машинах [9]. При этой схеме бортовые механизмы поворота могут исключаться из механической части трансмиссии, а поворот — обеспечиваться разностью частот вращения бортовых двигателей. При изменении направления вращения бортовых двигателей обеспечивается разворот машины вокруг ее центра масс. Такую схему можно реализовать и на колесных машинах, что исключает межколесные дифференциалы, реализует активный поворот и разворот вокруг центра масс.

Формирование электрической тяги на тракторе можно проследить, если механическую характеристику тягового двигателя (рис. 2) привести к движителям трактора на каждой ступени механической части трансмиссии. При этом получим теоретическую скоростную характеристику трактора, которая описывает тяговые и мощностные возможности его движителей на конкретной опорной поверхности и представляет собой зависимости снимаемых с движителей суммарных касательной силы тяги P_k и тяговой мощности на ведущих колесах N_k от теоретической скорости движения трактора V .

Скоростная характеристика трактора с электрической тягой (рис. 3), как и механическая характеристика ТАД, имеет на каждой i -ой ступени механической трансмиссии два характерных участка. Участок постоянной тяги $P_{ki\ const}$, на котором трактор трогается с места, и участок постоянной тяговой мощности на ведущих колесах $N_{ki\ const}$, на котором он выполняет свои основные функции. Участку механической характеристики ТАД $n_{тад} = 0 \dots n_{тад\ max}$ соответствуют участки теоретических скоростей трактора $V_i = 0 \dots V_{i\ min}$, а участку $n_{тад} = n_{тад\ min} \dots n_{тад\ max}$ — участки скоростей $V_i = V_{i\ min} \dots V_{i\ max}$.

Численные значения параметров скоростной характеристики определяются для каждой i -ой ступени по выражениям:

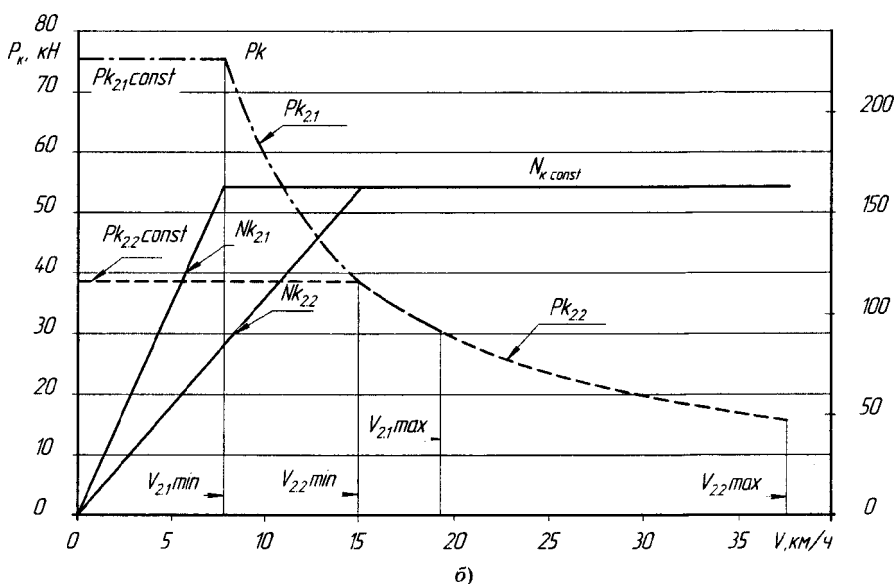
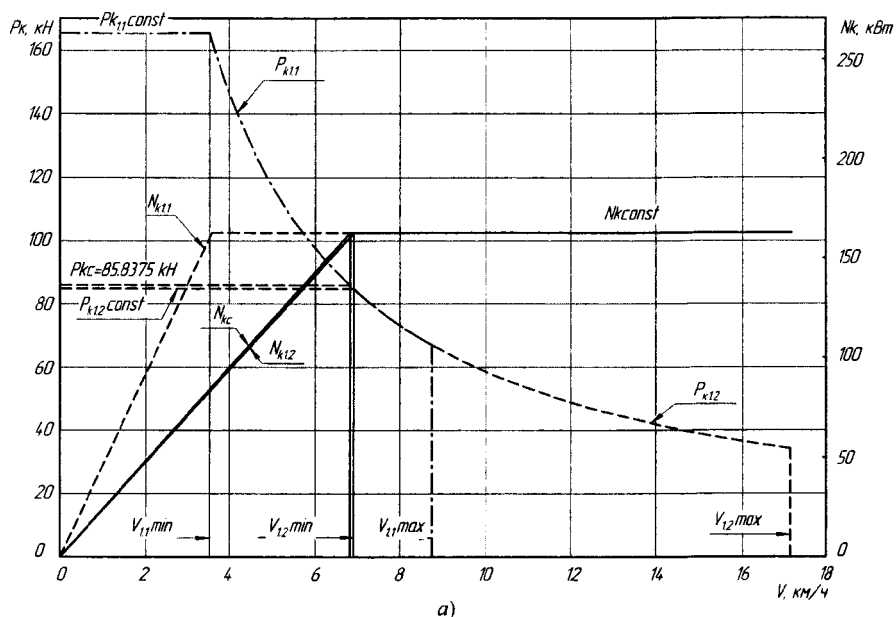


Рис. 3. Скоростная характеристика трактора "Беларус-3023" $P_k(V)$ и $N_k(V)$ на режимах "поле" (а) и "дорога" (б)

— на участке постоянной тяги

$$m_{\Sigma} g \phi_{\max} \geq P_{ki\ const} = \frac{M_{тад\ n} u_i \eta_{MTi}}{R_k}; \quad (2)$$

$$N_{ki} = N_{тад\ n} \eta_{MTi} \frac{V_i}{V_{i\ min}}; \quad (3)$$

— на участке постоянной мощности

$$P_{ki} = \frac{3,6 N_{тад\ n} \eta_{MTi}}{V_i}; \quad (4)$$

$$N_{ki\ const} = N_{тад\ n} \eta_{MTi}, \quad (5)$$

где $M_{тад\ n}$, $N_{тад\ n}$ — номинальные значения крутящего момента и мощ-

ности ТАД; u_i — передаточное число механической трансмиссии на каждой i -ой ступени; η_{MTi} — КПД механической трансмиссии на i -ой ступени; R_k — радиус качения ведущих колес трактора; ϕ_{\max} — максимальный коэффициент сцепления ведущих колес на конкретной опорной поверхности; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$; V_i — текущие значения теоретической скорости движения трактора.

$$V_i = \frac{3,6 \pi n_{тад} R_k}{30 u_i}. \quad (6)$$

Расчетные значения параметров механической характеристики ТАД

и соответствующие им значения параметров скоростной характеристики трактора "Беларус-3023" приведены в таблице.

Из рис. 3 и таблицы видно, что на участке постоянной тяговой мощности трактор может использовать номинальную мощность ТАД в полном объеме, бесступенчато регулируя силу тяги P_{ki} и скорость V_i .

На режиме "поле" (см. рис. 3, а, ступень 1.1) мощностные возможности ТАД ограничиваются сцепными свойствами движителей ($P_{кс} = 85,8375$ кН). Полная загрузка ТАД обеспечивается только с теоретической скорости $V = 6,83$ км/ч. На минимальной скорости ТАД нагружается до 51,88 % мощности, при этом касательная сила тяги колес $P_k = 84,778$ кН. На второй ступени режима "поле" ТАД нагружается до номинальной мощности на всем диапазоне от 6,9 до 17,15 км/ч и практически перекрывает агроскорости всех энергоемких тяговых с.-х. операций (кроме уборки корнеплодов). На режиме "дорога" (см. рис. 3, б) на асфальте трактор "Беларус-3023" реализует номинальную мощность на скоростях 7,65—37,15 км/ч. При этом перекрытие скоростей на ступенях 2.1 и 2.2 составляет 4,1 км/ч.

Однако для оценки тяговых и тягово-приводных возможностей трактора с электротягой необходима

характеристика, отражающая зависимость основных функциональных свойств (рабочей скорости движения V_p , буксования движителей δ , тяговой мощности на крюке $N_{кр}$, тягового КПД η_t и удельного расхода топлива g_p) от абсолютного $P_{кр}$ или относительного $\varphi_{кр}$ тягового усилия на крюке как на тяговом режиме работы, так и на тягово-приводном.

Расчет теоретической тяговой характеристики трактора с электротягой осуществляется с учетом механической характеристики тягового электродвигателя и буксования движителей при бесступенчатом регулировании скорости движения трактора, а из внешней скоростной характеристики дизеля учитывается только оптимальная по расходу топлива мощность $N_{д\text{ опт}}$ и удельный расход топлива $g_{e\text{ min}}$ при этой мощности.

Известно, что бесступенчатое регулирование скорости движения и тягового усилия трактора существенно снижает буксование движителей. Так, у колесного трактора кл. 0,9 с объемной гидромеханической трансмиссией буксование ведущих колес в 1,5 раза ниже, чем у такого же трактора с механической ступенчатой трансмиссией [10]. Поскольку данные по буксованию ведущих колес с.-х. тракторов с электромеханическими трансмиссиями еще не накоплены, приведенное соотношение

по буксованию можно рекомендовать для предварительного тягового анализа тракторов с электротягой.

Полученные на МТЗ при тяговых испытаниях трактора кл. 5 (Беларус-2822) зависимости буксования от усилия на крюке $\delta(P_{кр})$ были обработаны средствами Windows Excel и аппроксимированы экспоненциальной функцией (рис. 4).

$$\delta = \delta_0 e^{a\varphi_{кр}} = \delta_0 e^{a \frac{P_{кр}}{m_3 g}}, \quad (7)$$

где δ_0 — буксование ведущих колес при движении трактора без нагрузки на крюке ($P_{кр} = 0$; $\varphi_{кр} = 0$), на стерне $\delta_0 = 0,0107$, на сухом асфальтобетонном покрытии $\delta_0 = 0,008$; a — опытный коэффициент, на стерне $a = 5,6519$, на асфальтобетонном покрытии $a = 3,536$; $\varphi_{кр}$ — относительное тяговое усилие на крюке; $P_{кр}$ — тяговое усилие на крюке.

С учетом этого буксование ведущих колес трактора с электротягой опишется выражением:

— на стерне

$$\delta = 0,00713 e^{5,6519 \frac{P_{кр}}{m_3 g}}, \quad (8)$$

— на асфальте

$$\delta = 0,00533 e^{3,536 \frac{P_{кр}}{m_3 g}}. \quad (9)$$

Основные расчетные параметры механической характеристики тягового двигателя и параметры скоростной характеристики трактора "Беларус-3023"

Скоростная характеристика трактора		Механическая характеристика тягового двигателя		Частота вращения ротора, мин ⁻¹		Крутящий момент, Н·м		Мощность, кВт
				n_n	n_{max}	M_n	M_{min}	N_n
				1450	3600	1205,2	485,42	183
Режим движения	Ступень редуктора, i	Теоретическая скорость, км/ч		Касательная сила тяги по ТАД, кН		Тяговая мощность на ведущих колесах, кВт		
		V_{min}	V_{max}	$P_{k\text{ max}}$	$P_{k\text{ min}}$	N_k		
Поле	1.1	3,543	8,796	165,44	66,696	162,815		
	1.2	6,91	17,155	84,824	34,167	162,815		
Дорога	2.1	7,655	19,006	76,569	30,839	162,815		
	2.2	14,93	37,067	39,259	15,813	162,815		

Максимальная касательная сила тяги по сцеплению на стерне $P_{k\text{ max}} = m_3 g \varphi_{max} = 85,8375$ кН, на асфальте $P_{k\text{ max}} = 98,1$ кН

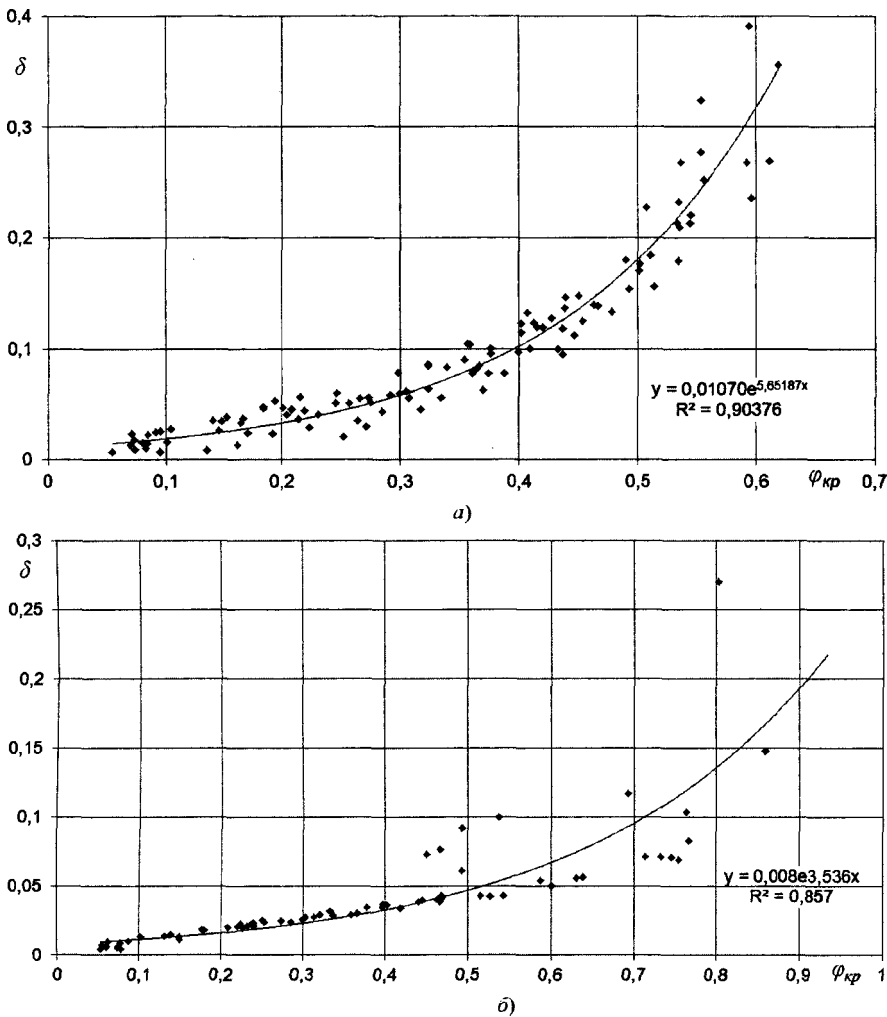


Рис. 4. Аппроксимация зависимости буксования от коэффициента использования сцепной массы на крюке $\delta(\varphi_{кр})$ для трактора кл. 5 "Беларус-2822" на стерне (а) и сухом асфальтобетонном покрытии (б)

Рабочая скорость движения трактора для каждой ступени механической части трансмиссии определяется по выражению:

$$V_{i \max}(1 - \delta_0) \geq V_p = \frac{3,6\pi N_{тад} \eta_{MTi}}{P_{кр} + P_f} (1 - \delta), \quad (10)$$

где $V_{i \max}$ — теоретическая скорость движения трактора при $n_{тад \max} = 3600 \text{ мин}^{-1}$ по выражению (6); δ и δ_0 — по выражению (8) или (9) в зависимости от опорной поверхности.

Поскольку рабочий участок механической характеристики тягового двигателя ограничивается частотой вращения его ротора $n_{тад} = n_{тад \min} \dots n_{тад \max}$ (см. рис. 3, б), то скорость V_p на каждой ступени механической трансмиссии ограничивается минимальным и максимальными значениями, соответствующи-

ми частотам вращения ротора тягового двигателя $n_{тад \min}$ и $n_{тад \max}$:

$$\frac{3,6\pi n_{тад \min} R_k}{30u_i} (1 - \delta_0) \leq V_p \leq \frac{3,6\pi n_{тад \max} R_k}{30u_i} (1 - \delta). \quad (11)$$

Ограничение рабочей скорости сверху соответствует тяговому усилию

$$P_{кр} = 0 \dots \frac{M_{тад \min} u_i \eta_{MTi}}{R_k}; \quad (12)$$

снизу — тяговому усилию

$$P_{кр \max} = \frac{M_{тад \max} u_i \eta_{MT}}{R_k} \leq m_3 g \varphi_{кр \max}, \quad (13)$$

где $M_{тад \min}$, $M_{тад \max}$ — минимальное и номинальное значения крутящего момента тягового двигателя; R_k —

радиус качения задних ведущих колес; u_i — передаточное число механической трансмиссии на каждой i -ой ступени редуктора; m_3 — эксплуатационная масса трактора.

Тяговая мощность:

$$N_{кр} = \frac{P_{кр} V_p}{3,6} = \frac{P_{кр} N_{тад} \eta_{MTi}}{P_{кр} + P_f} \left(1 - \delta_0 e^{\frac{a P_{кр}}{m_3 g}} \right). \quad (14)$$

Выразив номинальную мощность тягового двигателя через оптимальную мощность дизеля N_d при номинальной частоте вращения вала АМГ, КПД механической части трансмиссии η_{MTi} , КПД электрической передачи $\eta_{эп} = 0,8649$ [3] и с

учетом того, что $\frac{P_{кр}}{P_{кр} + P_f} = \eta_f$ и $(1 - \delta) = \eta_\delta$, получим:

$$N_{кр} = N_d \eta_{эп} \eta_{MTi} \eta_\delta \eta_f = N_d \eta_\tau, \quad (15)$$

где $\eta_\tau = \eta_{эп} \eta_{MTi} \eta_\delta \eta_f$ — тяговый КПД трактора.

Удельный расход топлива на единицу тяговой мощности:

$$g_\tau = \frac{N_d g_{e \min}}{N_{кр}}, \quad (16)$$

где $g_{e \min}$ — удельный расход топлива дизеля на номинальном режиме электрогенератора.

При реализации на тракторе электрического отбора мощности на тяговый двигатель может быть подана мощность не более

$$N_{тад} \leq N_d \eta_{амг} (1 - \gamma_0), \quad (17)$$

где $\gamma_0 = N_0 / N_d$ — относительная величина отбора мощности; $\eta_{амг}$ — КПД мотор-генератора вместе с блоком силового регулирования; N_0 — мощность отбора на привод активных рабочих органов агрегатируемых машин.

Рабочая скорость трактора:

$$V_p = \frac{3,6 N_d (1 - \gamma_0) \eta_{эп}}{P_{кр} + P_f} \times \left(1 - \delta_0 e^{\frac{a P_{кр}}{m_3 g}} \right) \quad (18)$$

при ограничениях по выражению (10).

Тяговая мощность на крюке:

$$N_{кр} = N_d (1 - \gamma_0) \eta_{эп} \eta_\delta \eta_f = N_d (1 - \gamma_0) \eta_\tau. \quad (19)$$

Удельный расход топлива на единицу тяговой мощности определяется по выражению (16), а удельный расход топлива на единицу мощности отбора:

$$g_0 = g_e \min / \eta_{амг} \quad (20)$$

Общий КПД трактора определяется по выражению:

$$\eta_{трак} = \eta_T (1 - \gamma_0) + \eta_{амг} \gamma_0 \quad (21)$$

Входные данные для расчета тяговой характеристики трактора "Беларус-3022"

- Эксплуатационная масса трактора, $m_э$, кг 12 500
- Оптимальная мощность двигателя, $N_{д опт}$, кВт 223
- Удельный расход топлива дизеля при оптимальной мощности, $g_e \min$, г/(кВт·ч) 210,08
- Радиус качения задних ведущих колес, $R_к$, м 0,908
- Номинальная мощность тягового двигателя, $N_{тд н}$, кВт 183
- Частота вращения вала тягового двигателя, \min^{-1} :
 - номинальная, $\eta_{тд н}$ 1450
 - максимальная, $\eta_{тд max}$ 3600
- Передаточные числа механической части трансмиссии:
 - на режиме "поле":
 - ступень 1.1, $u_{1.1}$ 140,106
 - ступень 1.2, $u_{1.2}$ 71,8344
 - на режиме "дорога":
 - ступень 2.1, $u_{2.1}$ 64,8471
 - ступень 2.2, $u_{2.2}$ 33,2521
 - заднего моста, $u_{эм}$ 27,618
- Максимальное тяговое усилие для расчета буксования:
 - на режиме "поле" (стерня), $P_к max$, кН ($\phi_{кр max}$) 85,8375 (0,7)
 - на режиме "дорога" (асфальт), $P_к max$, кН ($\phi_{кр min}$) 116,4937 (0,95)
- Соппротивление движению трактора:
 - на стерне, P_f , кН (f) 12,2625 (0,1)
 - на асфальтобетоне, P_f , кН (f) 2,4525 (0,02)
- Пределы изменения тягового усилия при расчете, кН:
 - на режиме "поле" (стерня), $P_к \min \dots P_к \max$ 0—73,575
 - ($\phi_{кр \min} \dots \phi_{кр \max}$) (0—0,6)

- на режиме "дорога" (асфальт), $P_к \min \dots P_к \max$ 0—98,1
- ($\phi_{кр \min} \dots \phi_{кр \max}$) (0—0,8)
- КПД:
 - механической части трансмиссии, $\eta_{мт}$ 0,8897
 - электрической передачи (АМГ-ТАД), $\eta_{эл}$ 0,8649
 - электромеханической трансмиссии, $\eta_{эмт}$ 0,7695

На рис. 5 показана теоретическая тяговая характеристика трактора "Беларус-3023" на стерне (режим "поле", ступени 1.1 и 1.2), построенная по приведенным выше выражениям и входным данным. Из нее видно, что режим постоянной мощности ТАД реализуется при тяговых усилиях $P_{кр} = 21,86 \dots 74$ кН. При этом обеспечиваются рабочие скорости трактора $V_p = 16,77 \dots 5,4$ км/ч

при буксовании ведущих колес $\delta = 0,02 \dots 0,213$, тяговая мощность $N_{кр} = 102,35 \dots 121,8$ кВт при удельном расходе топлива $g_T = 451,622 \dots 380,64$ г/(кВт·ч). При допустимом буксовании $\delta_{доп} = 0,16$ трактор реализует тяговое усилие $P_{кр} = 67,6$ кН, тяговую мощность $N_{кр} = 115,8$ кВт на скорости 6,2 км/ч при удельном расходе топлива $g_T = 405$ г/(кВт·ч).

Максимальную тяговую мощность $N_{кр max} = 121,8$ кВт трактор развивает при номинальном тяговом усилии $P_{кр н} = 55$ кН на рабочей скорости $V_p = 8$ км/ч при буксовании $\delta = 0,09$ и расходе топлива $g_T = 382$ г/(кВт·ч). Номинальное относительное тяговое усилие на крюке $\phi_{кр н} = P_{кр н} / m_э g = 0,448$, что на 12 % выше номинального значения $\phi_{кр н} = 0,4$ для трактора кл. 5 с механической 5-ступенчатой трансмиссией [4].

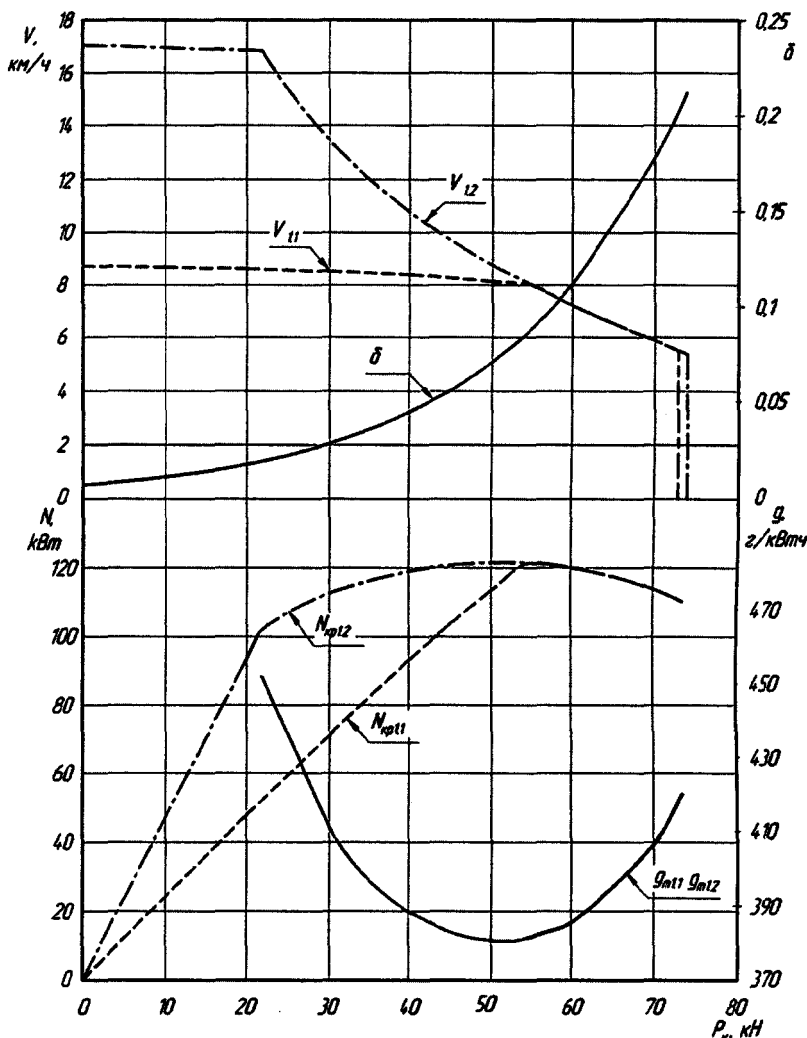


Рис. 5. Теоретическая тяговая характеристика трактора "Беларус-3023" на стерне

Такие же характеристики можно построить и на режиме "дорога" (асфальт), а также при электрическом отборе мощности по выражениям (17)–(21).

Для выявления преимуществ трактора с электротягой выполнено сравнение теоретических тяговых характеристик (рис. 6) на стерне тракторов "Беларус-3023" на режиме "поле" и "Беларус-3022" на втором скоростном диапазоне (передачи 7–12). Характеристики рассчитаны при равных номинальных мощностях двигателей и эксплуатационных массах.

Из рис. 6 видно, что при тяговых усилиях ниже номинального у серийного трактора с механической ступенчатой трансмиссией рабочие скорости V_p и тяговые мощности $N_{кр}$ на отдельных участках характеристики без учета потерь на переключение передач выше, чем у трактора с электротягой. При достижении тяги $P_{кр} \approx 56...57$ кН эти преимущества теряются и переходят к трактору с электротягой. Особенно заметны преимущества трактора с электротягой по сравнению с серийным по удельному расходу топлива (см. рис. 6, в). Если у серийного трактора минимальный расход топлива зависит от номера передачи и тягового усилия и сохраняет минимальные значения на узком участке тягового усилия (≈ 10 кН), то у трактора с электротягой удельный расход топлива на всем рабочем участке изменяется в пределах 380,6...451,6 г/(кВт·ч), или не более чем на 18,6 %.

По тяговому КПД трактор с электротрансмиссией уступает трактору с механической трансмиссией до 6 %, но обеспечивает более высокую степень использования номинальной мощности двигателя на крюке $\gamma_{кр}$. Так, у трактора с механической трансмиссией из-за колебаний приведенного к валу ДВС крутящего момента средняя загрузка двигателя составляет 94 % от номинальной ($\gamma_{д} \approx 0,94 N_{н}$) [11]. Из-за ступенчатого изменения скорости движения и работы ДВС на перегрузочной ветви характеристики мощность дизеля может изменяться в пределах 0,9–0,95 от номинальной. Все вместе приводит к тому, что средняя загрузка ДВС не превышает 0,9 $N_{н}$. На тракторе с электротя-

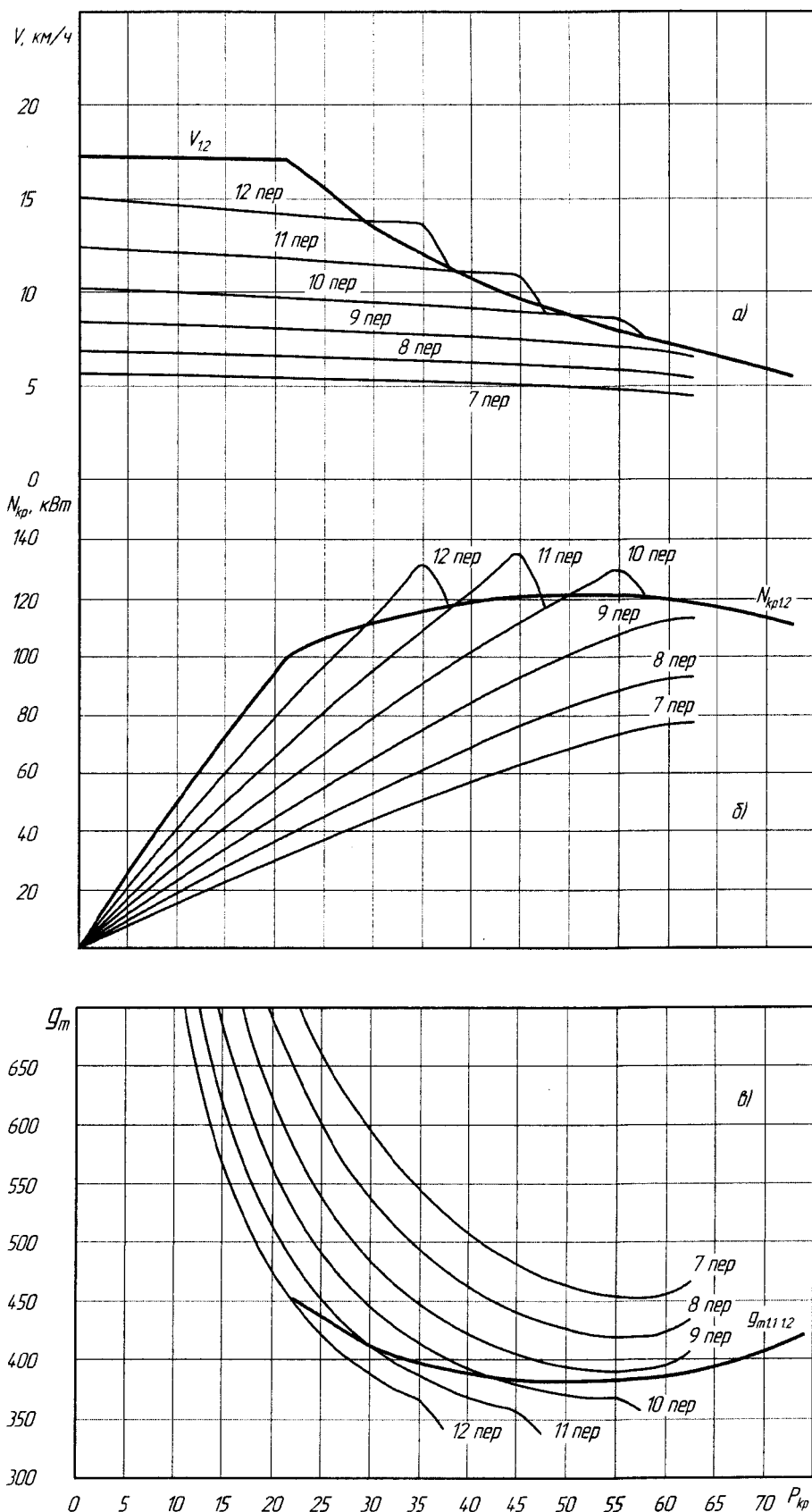


Рис. 6. Сравнение тяговых показателей тракторов с электромеханической и механической ступенчатой трансмиссиями:

а — по рабочим скоростям V_p ; б — по тяговой мощности $N_{кр}$; в — по удельному расходу топлива g_T

гой можно обеспечить загрузку дизеля на 100 % от номинальной, как на электротормозном стенде. В первом случае тяговая нагрузка на крюке будет $\gamma_{кр} = \eta_{т0} = 0,574$, а во втором $\gamma_{кр} = 0,56$.

Все это в совокупности обеспечивает повышение производительности трактора с электромеханической трансмиссией и снижает его погектарный расход топлива [3]. Дальнейшее снижение расхода топлива возможно путем замены традиционной вальной дизель-генераторной энергоустановки на свободно-поршневую дизель-генераторную установку возвратно-поступательного действия [12].

Применение на тракторах дизель-электрических силовых установок представляет широкие возможности для использования электрических отборов мощности на привод активных рабочих органов с.-х. машин, а также электропривода вместо традиционных гидроприводов для управления силовыми агрегатами трактора, рулевого управления, навесных систем, автоблокировки дифференциала, автоматического включения—выключения винтового моторного привода. Это, в свою очередь, открывает широкие возможности для сокращения объемов механических приводов и комплексной автоматизации тракторов и МТА вплоть до создания тракторов-автоматов и МТА-автоматов. Так, у гидроприводов автоматизация управления обеспечивается по ступеням "электронный блок — электромагнит — гидравлический клапан — гидролиния — силовой цилиндр — механическое устройство", а при электроприводе управление включает только "электронный блок — электродвигатель — механический привод". В электроприводе электронный блок в реальном времени управляет электромагнитным моментом электродвигателя или силой электромагнита.

Говоря о преимуществах электротяги на тракторе, необходимо учитывать, что внедрение такого трактора создаст благоприятные предпосылки для отказа в будущем от ДВС в с.-х. производстве и перевода земледелия на электроприводные технологии. В Европе фирмой New Holland

создан трактор NH² без ДВС, на котором в качестве силовой установки используется водородный электрохимический генератор. Одной заправки водорода пока хватает только на 2 ч работы под полной нагрузкой, но фирма намерена увеличить это время до 7 ч [13].

Следует обратить внимание и на то, что мировая электротехническая наука осваивает бесконтактную передачу электроэнергии, предложенную Николом Тесла еще 100 лет назад. По этому принципу уже сегодня работают модели электромобилей и электрокатеров с бесконтактным электроприводом [14]. В ВИЭСХе ведутся исследования по созданию энергоэффективного гибридного трактора мощностью 50—100 кВт с беспроводной системой зарядки электроаккумуляторов, экономией топлива 30 % и снижением уровня вредных выбросов в 5 раз [15], а также агробота с резонансной системой электроснабжения [16]. Успешное решение этой проблемы обеспечит в будущем полный переход на электроприводные экологически чистые технологии и создаст условия для комплексной автоматизации в земледелии.

Выводы

Внедрение на с.-х. тракторах тягового электропривода и электрического отбора мощности на привод активных рабочих органов сельхозмашин направлено на снижение вредных выбросов от ДВС и расхода топлива, повышение производительности МТА, создание условий для комплексной автоматизации МТА и сельскохозяйственных технологий.

При успешном решении этих задач будут созданы условия для отказа от ДВС как силовой установки трактора и перевода земледелия на электроприводные мобильные технологии.

Список литературы

1. Ксеневич И. П., Шевцов В. Г. Концепция тракторной моторно-трансмиссионной установки // Тракторы и сельскохозяйственные машины. — 1999, № 12.
2. Николаев Е. В., Нистратова Н. С. Экологическая диагностика тракторов и

самоходных машин // Тракторы и сельскохозяйственные машины. — 2012, № 4.

3. Трактор с электромеханической трансмиссией / С. Н. Флоренцев и др. // Тракторы и сельскохозяйственные машины. — 2010, № 7.

4. Выбор типа и параметров современной тракторной трансмиссии / П. А. Амельченко и др. // Тракторы и сельскохозяйственные машины. — 2013, № 8.

5. Бигель Н. В. Особенности конструкции самосвалов БелАЗ с электромеханической трансмиссией // Автомобильная промышленность. — 2010, № 12.

6. Бойцов В. В. Межотраслевая унификация и агрегатирование самоходных машин-орудий и автотранспорта. — М.: Издательство стандартов, 1975.

7. Четыре двигателя экономят 1/4 топлива // Современная сельхозтехника и оборудование. — 2011, № 4.

8. Электромеханические трансмиссии гусеничных тракторов. Теория и расчет / П. П. Исаков и др. — Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1981.

9. Кулаков А. Т., Макушин А. А. Разработка алтайского трактора в варианте с электромеханической трансмиссией // Тракторы и сельскохозяйственные машины. — 2012, № 2.

10. Деев О. И. Исследование бесступенчатой объемной гидромеханической трансмиссии сельскохозяйственного трактора и ее влияние на показатели работы машинно-тракторного агрегата: Дис. ... канд. техн. наук. — Воронеж: Воронежский СХИ, 1978.

11. Производственная эксплуатация машинно-тракторного парка / А. А. Зангиев и др. — М.: Колос, 1996.

12. Плиский Ф. И. Энергоустановки со свободнопоршневыми двигатель-генераторами // Мобильная техника. — 2004, № 2.

13. Взгляд в будущее // Современная сельхозтехника и оборудование. — 2009, № 3.

14. Стребков Д. С. Никола Тесла и современные проблемы электроэнергетики // Приводная техника. — 2007, № 1.

15. Стребков Д. С. Возобновляемая энергетика и экология // Мат-лы 7-ой междунар. науч.-практ. конф. "Экология и сельскохозяйственные технологии: агроинженерные решения". Т. 1. — СПб.: СЗНИИМЭСХ, 2011.

16. Управление движением мобильных агроботов с резонансной системой электроснабжения / Д. С. Стребков и др. // Мат-лы 7-ой междунар. науч.-практ. конф. "Экология и сельскохозяйственные технологии: агроинженерные решения". Т. 3. — СПб.: СЗНИИМЭСХ, 2011.