

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЯГОВОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ТРАКТОРА

OPTIMIZATION OF TRACTION CHARACTERISTICS OF AGRICULTURAL TRACTORS

В.А. САМСОНОВ¹, д.т.н.
Ю.Ф. ЛАЧУГА², академик РАН

¹ Автономная некоммерческая организация «Редакция журнала «Механизация и электрификация сельского хозяйства», Москва, Россия,

² Российская академия наук (РАН), Москва, Россия, mehelagro@mail.ru

V.A. SAMSONOV¹, DSc in Engineering
YU.F. LACHUGA², Academician of the Russian Academy of Sciences

¹ Autonomous non-commercial organization «Editorial Board of the journal «Mechanization and electrification of agriculture», Moscow, Russia,

² Russian Academy of Science, Moscow, Russia, mehelagro@mail.ru

Производительность машинно-тракторного агрегата зависит от энергонасыщенности трактора. Принимаем, что оптимальная тяговая характеристика соответствует минимальной эксплуатационной массе трактора и его максимальной энергонасыщенности, при которой достигается максимальная производительность машинно-тракторного агрегата при наименьшем расходе топлива и соблюдении ограничений по тяговому усилию, буксованию и теоретической скорости. В качестве критерия для определения максимальной энергонасыщенности принят максимум коэффициента производительности при максимуме тяговой мощности и максимуме тягового кпд. Расчет оптимальной тяговой характеристики – актуальная задача теории трактора. Цель исследования заключается в разработке методики и алгоритмов расчета показателей оптимальной тяговой характеристики трактора при изменении частоты вращения коленчатого вала двигателя. Объекты исследования – колесные и гусеничные тракторы общего назначения. Исходный материал: показатели двигателя и трактора; коэффициенты, характеризующие тягово-сцепные свойства трактора; уравнение баланса мощности трактора; функции буксования; зависимости расхода топлива двигателем и его крутящего момента от частоты вращения коленчатого вала. Метод исследования – расчет с использованием основных формул теории трактора при изменении частоты вращения коленчатого вала на один оборот. С учетом принятых значений номинальной частоты вращения коленчатого вала двигателя и коэффициента его приспособляемости по крутящему моменту рассчитаны передаточные числа трансмиссии. Методика расчета оптимальной тяговой характеристики разработана для тракторов с минимальной эксплуатационной массой, рассчитанной с учетом номинальных тяговых усилий и коэффициентов использования силы тяжести тракторов. Максимальная энергонасыщенность для каждого типа и тягового класса трактора определяется расчетом тяговой характеристики на передаче, на которой достигаются максимумы коэффициента производительности, тяговой мощности и тягового кпд. Основной вывод: оптимальная тяговая характеристика соответствует минимальной эксплуатационной массе трактора и его максимальной энергонасыщенности.

Ключевые слова: сельскохозяйственный трактор, максимальная энергонасыщенность, оптимальная тяговая характеристика, производительность.

The productivity of the machine-tractor unit depends on the energy saturation of the tractor. It is assumed that the optimum traction characteristic corresponds to the minimum operating weight of the tractor and its maximum energy saturation, at which the maximum productivity of the machine and tractor unit is achieved with the lowest fuel consumption and compliance with restrictions on tractive effort, slippage and theoretical speed. As a criterion for determining the maximum energy saturation, the maximum efficiency coefficient is adopted with maximum tractive power and maximum tractive efficiency. Calculation of the optimal traction characteristics is an actual task of the theory of the tractor. The purpose of the study is to develop a methodology and algorithms for calculating the indicators of the optimal traction characteristics of the tractor when the engine speed of the crankshaft is changed. The objects of research are wheeled and caterpillar tractors of general purpose. Input data: engine and tractor performance indicators; coefficients that characterize the traction and coupling properties of the tractor; the tractor power balance equation; slipping functions; the dependence of the fuel consumption of the engine and its torque on the speed of the crankshaft. The method of research is the calculation using the basic formulas of the theory of the tractor when the speed of the crankshaft is changed by one rotation. Taking into account the accepted values of the nominal engine speed and the torque adaptive factor, the gear ratio is calculated. The calculation procedure for the optimum traction characteristic is developed for tractors with a minimum operating weight, calculated taking into account the nominal tractive effort and the coefficients of using the gravity of the tractors. The maximum energy saturation for each type and traction class of the tractor is determined by calculating the tractive characteristic of the transmission, at which the maximum efficiency factor, traction power and traction efficiency are reached. The main conclusion: the optimum traction characteristic corresponds to the minimum operating weight of the tractor and its maximum energy saturation.

Keywords: agricultural tractor, maximum energy saturation, optimal traction characteristics, productivity.

Введение

В работе [1] Самсонова В.А. и Лачуги Ю.Ф. определены критерии расчета максимальной энергонасыщенности \mathcal{E}_{\max} трактора: максимум коэффициента производительности k_{Π} при максимуме тяговой мощности $N_{\text{кр}}$ и максимуме тягового КПД $\eta_{\text{т}}$:

$$k_{\Pi} = N_{\text{кр}}/\mu \rightarrow \max, \quad (1)$$

$$N_{\text{кр}} \rightarrow \max, \quad (2)$$

$$\eta_{\text{т}} \rightarrow \max, \quad (3)$$

где μ – безразмерный коэффициент, учитывающий увеличение тягового сопротивления при рабочей скорости $v > 5$ км/ч (на стерне),

$$\mu = 0,052v^2 + 0,9. \quad (4)$$

Принимаем, что оптимальная тяговая характеристика соответствует минимальной эксплуатационной массе трактора и его максимальной энергонасыщенности, при которой достигается максимальная производительность машинно-тракторного агрегата при наименьшем расходе топлива и соблюдении ограничений по тяговому усилию, буксованию и теоретической скорости.

Расчет оптимальной тяговой характеристики – актуальная задача теории трактора.

Цель исследования

Цель исследования заключается в разработке методики и алгоритмов расчета показателей оптимальной тяговой характеристики при изменении частоты вращения коленчатого вала двигателя.

Материалы и методы исследования

Методика расчета рассмотрена на примере колесных и гусеничных тракторов общего назначения разных тяговых классов.

Исходный материал: показатели двигателя и трактора; коэффициенты, характеризующие тягово-цепные свойства трактора; уравнение баланса мощности трактора; функции буксования; зависимости расхода топлива двигателем и его крутящего момента от частоты вращения коленчатого вала.

Метод исследования – расчет с использованием основных формул теории трактора при изменении частоты вращения коленчатого вала на один оборот.

Результаты и обсуждение

Методика расчета оптимальной тяговой характеристики (далее – ОТХ) и ее оценка включает решение следующих задач.

1. С учетом номинальных тяговых усилий $P_{\text{крн}}$ и коэффициентов $\varphi_{\text{кр}}$ использования силы тяжести трактора определить минимальные эксплуатационные массы тракторов разных тяговых классов.

2. С учетом принятых показателей двигателя рассчитать теоретические скорости и передаточные числа на передачах трансмиссий тракторов.

3. По критериям (1), (2), (3) рассчитать \mathcal{E}_{\max} тракторов.

4. С учетом принятой минимальной теоретической скорости рассчитать минимальную энергонасыщенность \mathcal{E}_{\min} тракторов (тяговую характеристику при \mathcal{E}_{\min} обозначим как МТХ).

5. Рассчитать показатели МТХ и ОТХ.

6. Сравнить ОТХ и МТХ по показателям эффективности: производительность, погектарный расход топлива, расход топлива на единицу производительности, коэффициент вариации тягового кпд по передачам.

Показатели, необходимые для расчета тяговой характеристики: $N_{\text{н}}$ – номинальная мощность двигателя, Вт; m – эксплуатационная масса трактора, кг; $P_{\text{крн}}$ – номинальное тяговое усилие, Н; $n_{\text{н}}$, $n_{\text{м}}$, $n_{\text{х}}$ – соответственно, частота вращения коленчатого вала двигателя номинальная, при максимальном крутящем моменте, холостого хода, мин⁻¹; $k_{\text{м}}$ – коэффициент приспособляемости двигателя по крутящему моменту; $M_{\text{н}}$, $M_{\text{м}}$ – соответственно, номинальный и максимальный крутящий момент двигателя, Н·м; $\varepsilon_{\text{н}}$, $\varepsilon_{\text{м}}$ – соответственно, коэффициент загрузки двигателя по мощности и моменту; n – количество рабочих передач; q – знаменатель геометрического ряда передач; $P_{\text{кр1}} \dots P_{\text{крn}}$ – диапазон тягового усилия трактора на передачах $1 \dots n$, Н; $v_{\text{т1}} \dots v_{\text{тn}}$ – диапазон теоретической скорости на передачах $1 \dots n$, км/ч; $\eta_{\text{м}}$ – КПД трансмиссии; δ – буксование; f – коэффициент сопротивления качению трактора; $i_{\text{т1}} \dots i_{\text{тn}}$ – диапазон передаточных чисел трансмиссии на передачах $1 \dots n$; $r_{\text{к}}$ – радиус качения колеса колесного трактора или радиус окружности касания ведущей звездочки с траком у гусеничного трактора.

Исходные данные для расчета представлены в табл. 1 (К3, К4, К5, Г3 – условные обозначения тракторов (теоретических) с минимальной эксплуатационной массой).

Показатели $\varphi_{\text{кр}}$, f , $\eta_{\text{м}}$, $v_{\text{т1}}$ и $v_{\text{тn}}$ приняты по рекомендациям [2, 3]; $r_{\text{к}}$ у К3 принят по аналогии с Т-150К, у К4 – по аналогии с К-424 «Кировец» [4], у К-5 – по аналогии с К-701, у Г3 – по аналогии с ДТ-75М; значения $n_{\text{н}}$, $n_{\text{м}}$, $n_{\text{х}}$, $k_{\text{м}}$ приняты как у двигателей ЯМЗ-53622, ЯМЗ-53622-10, ЯМЗ-53622-30 [5].

Задача 1. Минимальные эксплуатационные массы тракторов рассчитываем по формуле:

$$m = P_{крн} / \varphi_{кр} g.$$

Результаты расчета представлены в табл. 1.

Задача 2. Исходное передаточное число колесных тракторов:

$$i_{т1} = (\pi n_n r_k / 30) / (v_{т1} / 3,6)$$

находим при $v_{т1} = 10$ км/ч, ГЗ – при $v_{т1} = 8$ км/ч.

Передаточные числа и теоретические скорости на передачах:

$$i_{тj} = i_{т1} / q^{j-1}; v_{тj} = v_{т1} q^{j-1},$$

где $j = 2 \dots n$; $q = 0,8757$ (определен в [1] при $k_m = 1,3$).

Результаты расчета представлены в табл. 2.

Задача 3. Для ее решения необходимы функции: $\delta(\varphi_{кр})$ – буксование трактора; $M_e(n_e)$ – зависимость текущего крутящего момента двигателя от текущей частоты вращения коленчатого вала.

Функции буксования находим аппроксимацией кривых $\delta(\varphi_{кр})$, полученных по осредненным данным [2]:

– для колесных тракторов:

$$\delta = 0,02879397 + 0,1489948 \varphi_{кр} - 0,6006476 \varphi_{кр}^2 + 1,929105 \varphi_{кр}^3; \quad (5)$$

– для гусеничных тракторов:

$$\delta = -0,5126089 + 3,425804 \varphi_{кр} - 7,34254 \varphi_{кр}^2 + 5,298483 \varphi_{кр}^3. \quad (6)$$

Используем выражения (5) и (6) для расчета максимального тягового КПД. Алгоритм расчета (изменяем $\varphi_{кр}$ в цикле с шагом 0,01): функции

Таблица 1

Исходные данные для расчета

Показатели	Колесные тракторы			Гусеничный трактор тягового класса 3 (ГЗ)
	Тяговый класс 3 (К3)	Тяговый класс 4 (К4)	Тяговый класс 5 (К5)	
$P_{крн}$, кН	36	45	54	36
$\varphi_{кр}$	0,45			0,6
m , т (минимальная)	8,2	10,2	12,4	6,2
r_k , м	0,7	0,8	0,9	0,36
f	0,12			0,08
η_m	0,9			
n_n , мин ⁻¹	2300			
n_m , мин ⁻¹	1600			
n_x , мин ⁻¹	2500			
k_m	1,3			
$v_{т1}$, км/ч	10			8
$v_{тн}$, км/ч	17			12

Таблица 2

Теоретические скорости и передаточные числа трансмиссий тракторов

$v_{т}$, км/ч, колесных тракторов	К3	К4	К5	ГЗ	
	i_t			$v_{т}$, км/ч	i_t
10,00	60,6648	69,3312	77,9976	8,00	38,9988
11,42	53,1241	60,7133	68,3025	9,16	34,0654
13,04	46,5208	53,1666	59,8125	10,48	29,7562
14,89	40,7388	46,5580	52,3778	12,00	25,9920
17,00	35,6745	40,7709	45,8672	–	22,7040
–	30,8497	35,7031	40,1659	–	–

(5) или (6); $\eta_\delta = 1 - \delta$ – коэффициент, учитывающий потери энергии на буксование; $\eta_f = \varphi_{кр}/(\varphi_{кр} + f)$ – коэффициент, учитывающий потери энергии на качение трактора; $\eta_t = \eta_m \eta_\delta \eta_f$ – тяговый КПД.

Результаты расчета: максимальный тяговый КПД колесных тракторов – $\eta_{тmax} = 0,6125$ при $\delta = 10,9\%$, гусеничных – $\eta_{тmax} = 0,7610$ при $\delta = 3,6\%$.

Полученные значения $\eta_{тmax}$ используем далее для определения максимальной энергонасыщенности тракторов.

Функции $M_e(n_e)$ по аналогии с двигателями ЯМЗ-53622, ЯМЗ-53622-10, ЯМЗ-53622-30 [5] принимаем прямыми:

– на корректорном участке:

$$M_e = M_n + (M_m - M_n)(n_n - n_e)/(n_n - n_e); \quad (7)$$

– на регуляторном участке:

$$M_e = M_n(n_x - n_e)/(n_x - n_n). \quad (8)$$

Максимальную энергонасыщенность находим по критериям (1), (2), (3) изменением Э методом подбора. Алгоритм расчета Θ_{max} (алгоритм 1; n_e изменяем в цикле с шагом 1 мин^{-1} ; в программу вводим Θ, i_{vj} из табл. 2, n_n, n_m, n_x, m, f): $N_n = \Theta m$; $M_n = 30N_n/\pi n_n$; $M_m = k_m M_n$; если двигатель работает на регуляторном участке скоростной характеристики – формула (8); при работе двигателя на корректорном участке скоростной характеристики – формула (7); $\varepsilon_m = M_e/M_n$; $\varepsilon_n = \varepsilon_m n_e/n_n$; $P_k = \eta_m \varepsilon_m M_n i_{vj}/r_k$; $v_t = \eta_m \varepsilon_n N_n/P_k$; $P_{кр} = P_k - m g f$; $\varphi_{кр} = P_{кр}/m g$; δ – по формулам (5) или (6); $\eta_\delta = 1 - \delta$; $v = v_t \eta_\delta$; $N_{кр} = P_{кр} v$; $\eta_t = N_{кр}/\varepsilon_n N_n$; μ – по формуле (4); k_n – по формуле (3).

Результаты расчета по алгоритму 1: у всех колесных тракторов $\Theta_{max} = 23,1 \text{ кВт/т}$ (у К3 – на передаче с $i_m = 40,7383$, у К4 – на передаче с $i_m = 46,5580$, у К5 – на передаче с $i_m = 52,3778$); у Г3 – $\Theta_{max} = 18,1 \text{ кВт/т}$ – на передаче с $i_m = 34,0654$.

Задача 4. Минимальную энергонасыщенность рассчитываем по алгоритму 1 по критериям (2), (3): колесные тракторы – при $v_{т1} = 10 \text{ км/ч}$, гусеничные – при $v_{т1} = 8 \text{ км/ч}$. Результаты расчета: $\Theta_{min} = 17,2 \text{ кВт/т}$ – у К3, $\Theta_{min} = 17,25 \text{ кВт/т}$ – у К4, $\Theta_{min} = 17,08 \text{ кВт/т}$ – у К5, $\Theta_{min} = 16,28 \text{ кВт/т}$ – у Г3.

Задача 5. При расчете МТХ и ОТХ для оценки эффективности тракторов, кроме k_n , используем показатели:

– часовой расход топлива, кг/ч:

$$G_q = g_e \varepsilon_n N_n / 10^6, \quad (9)$$

где g_e – удельный расход топлива двигателем, г/(кВт·ч); размерность N_n – [Вт];

– коэффициент погектарного расхода топлива, (кг/ч)/кВт:

$$G_{гп} = G_q/k_n, \quad (10)$$

где размерность k_n – [кВт];

– коэффициент крюкового расхода топлива на единицу производительности, [г/(кВт·ч)]/кВт (относительный полезный расход топлива или стоимость единицы производительности):

$$g_{кpo} = g_e/k_n, \quad (11)$$

где крюковой расход топлива, г/(кВт·ч),

$$g_{кр} = g_e/\eta_t. \quad (12)$$

Для расчета g_e используем формулу [1]:

$$g_e = 139,5 + 0,025n_e. \quad (13)$$

Алгоритм расчета МТХ и ОТХ (алгоритм 2) реализуем при изменении n_e с шагом 1 мин^{-1} (в программу вводим Θ_{min} или Θ_{max} , i_{vj} , n_n , n_m , n_x , m , f , η_m): $N_n = \Theta_{min} m$ или $N_n = \Theta_{max} m$; $M_n = 30N_n/\pi n_n$; $M_m = k_m M_n$; если двигатель работает на регуляторном участке скоростной характеристики – формула (8); при работе двигателя на корректорном участке скоростной характеристики – формула (7); $\varepsilon_m = M_e/M_n$; $\varepsilon_n = \varepsilon_m n_e/n_n$; $P_k = \eta_m \varepsilon_m M_n i_{vj}/r_k$; $v_t = \eta_m \varepsilon_n N_n/P_k$; $P_{кр} = P_k - m g f$, $\varphi_{кр} = P_{кр}/m g$; δ – по формулам (5) или (6); $\eta_\delta = 1 - \delta$; $v = v_t \eta_\delta$; $N_{кр} = P_{кр} v$; $\eta_t = N_{кр}/\varepsilon_n N_n$; g_e – по формуле (13); $g_{кр}$ – по формуле (12); μ – по формуле (4); k_n – по формуле (3); G_q – по формуле (9); $G_{гп}$ – по формуле (10); $g_{кpo}$ – по формуле (11).

Примеры расчетов МТХ и ОТХ по алгоритму 2 представлены в табл. 3–5. У всех тракторов показатели МТХ соответствуют критериям (2) и (3). У К3 и К4 показатели на передачах 1, 2, 3 соответствуют $P_{крn}$, на передачах 4 – критериям (1), (2), (3), на передачах 5 и 6 – критериям (2) и (3). У Г3 показатели на передаче 1 соответствуют $P_{крn}$, на передаче 2 – критериям (1), (2), (3), на передачах 3, 4 и 5 – критериям (2) и (3). По ОТХ у всех тракторов на всех передачах при практически одинаковом погектарном расходе топлива (коэффициент $G_{гп}$) больше производительность (больше k_n) и меньше относительный полезный расход топлива (меньше $g_{кpo}$).

Задача 6. Для ее решения по данным табл. 3–5 находим средние геометрические значения k_n , $g_{кpo}$ и $G_{гп}$, по программе статистической обработки чисел – математическое ожидание m_n , среднее квадратичное отклонение σ_n и коэффициент вариации λ_n тягового КПД по всему тяговому диапазону (табл. 6). Показатели эффективности ОТХ по сравнению с МТХ представлены в табл. 7. Из нее следует, что при работе тракторов с ОТХ существенно увеличивается производительность, снижаются относительный расход

топлива и неравномерность изменения тягового КПД по передачам.

С учетом полученных значений максимальной энергонасыщенности найдем номинальную мощность, обеспечивающую работу трактора на оптимальной тяговой характеристике:

$$\begin{aligned} K3 - N_n &= 23,1 \cdot 8,2 = 189,42 \text{ кВт}; \\ K4 - N_n &= 23,1 \cdot 10,2 = 235,62 \text{ кВт}; \\ K5 - N_n &= 23,1 \cdot 12,4 = 286,44 \text{ кВт}; \\ Г3 - N_n &= 18,1 \cdot 6,2 = 112,22 \text{ кВт}. \end{aligned}$$

Таблица 3

Тяговые характеристики К3 (верхние строки – МТХ, $\Theta = 17,2$ кВт/т; нижние строки – ОТХ, $\Theta = 23,1$ кВт/т)

Показатели	i_r / Номер передачи					
	60,6648 1	53,1241 2	46,5208 3	40,7383 4	35,6745 5	30,8497 6
	Значения показателей					
$n_e, \text{ мин}^{-1}$	2300 2351	2296 2330	2158 2305	2048 2300	1955 2187	1866 1988
ε_N	1,000 0,762	1,000 0,861	0,995 0,977	0,987 1,000	0,976 0,997	0,962 0,980
ε_m	1,000 0,745	1,002 0,850	1,061 0,975	1,108 1,000	1,148 1,048	1,186 1,134
$P_{кр}, \text{ кН}$	36,044 36,069	30,432 36,029	27,522 36,234	24,348 31,560	21,193 28,185	17,907 25,729
$v_r, \text{ км/ч}$	10,00 10,22	11,40 11,57	12,24 13,07	13,26 14,89	14,45 16,17	15,95 17,00
$v, \text{ км/ч}$	8,51 8,70	10,22 9,85	11,17 11,10	12,30 13,23	13,56 14,71	15,10 15,67
$N_{кр}, \text{ кВт}$	85,253 87,180	86,378 98,600	85,428 111,760	83,198 116,019	79,847 115,172	75,116 111,989
η_r	0,6045 0,6044	0,6125 0,6045	0,6085 0,6038	0,5979 0,6125	0,5802 0,6099	0,5535 0,6033
$\delta, \%$	14,9 14,9	10,4 14,8	8,7 15,0	7,2 11,1	6,2 9,0	5,3 7,8
$g_{кр}, \text{ г/кВт}\cdot\text{ч}$	326 328	321 327	318 326	319 322	325 318	336 314
$G_q, \text{ кг/ч}$	27,784 28,600	27,770 32,254	27,157 36,485	26,536 37,315	25,922 36,667	25,262 35,118
$G_{гп}, \text{ (кг/ч)/кВт}$	0,388 0,395	0,424 0,421	0,445 0,455	0,480 0,515	0,532 0,563	0,610 0,591
$k_n, \text{ кВт}$	71,587 72,422	65,491 76,467	60,977 80,131	55,201 72,389	48,742 65,133	41,387 59,407
$g_{кpo}, \text{ (г/кВт}\cdot\text{ч)/кВт}$	4,553 4,530	4,990 4,278	5,214 4,074	5,778 4,443	6,661 4,888	8,126 5,279

Таблица 4

Тяговые характеристики К4 (верхние строки – МТХ, Э = 17,25 кВт/т; нижние строки – ОТХ, Э = 23,1 кВт/т)

Показатели	i_t / Номер передачи					
	69,3312 1	60,7133 2	53,1666 3	46,5580 4	35,7031 40,7709 5	31,2651 35,7031 6
	Значения показателей					
n_e , мин ⁻¹	2300 2351	2300 2330	2300 2306	2279 2300	1875 2187	1790 2075
ε_N	1,000 0,762	1,000 0,861	1,000 0,973	0,998 1,000	0,964 0,997	0,948 0,989
ε_M	1,000 0,745	1,000 0,850	1,000 0,970	1,007 1,000	1,182 1,048	1,219 1,096
$P_{кр}$, кН	45,000 44,867	37,914 44,939	31,709 44,901	26,536 39,258	22,697 35,162	19,319 31,000
v_T , км/ч	10,00 10,22	11,42 11,57	13,04 13,07	14,76 14,89	15,83 16,17	17,26 17,52
v , км/ч	8,50 8,70	10,23 9,84	12,04 11,13	13,84 13,23	14,97 14,70	16,41 16,20
$N_{кр}$, кВт	106,278 108,443	107,764 122,848	106,007 138,771	102,015 144,316	94,397 143,608	88,073 140,353
η_T	0,6040 0,6044	0,6125 0,6042	0,6025 0,6043	0,5812 0,6125	0,5567 0,6101	0,5278 0,6009
δ , %	15,0 14,9	10,4 14,9	7,7 14,9	6,2 11,1	5,4 9,1	4,5 7,5
$g_{кр}$, г/кВт·ч	326 328	322 327	327 326	338 322	335 318	348 318
G_q , кг/ч	34,662 35,576	34,662 40,208	34,662 45,274	34,487 46,417	31,602 45,709	30,744 44,699
$G_{пн}$, (кг/ч)/кВт	0,388 0,395	0,425 0,422	1,484 0,456	0,564 0,515	0,602 0,563	0,691 0,622
$k_{п}$, кВт	89,306 90,085	81,634 95,336	71,569 99,357	61,140 90,045	52,458 81,253	44,466 71,865
$g_{кpo}$, (г/кВт·ч)/кВт	3,652 3,642	3,94 3,433	4,569 3,284	5,529 3,572	6,382 3,917	7,851 4,432

Таблица 5

Тяговые характеристики Г3 (верхние строки – МТХ, Э = 16,28 кВт/т; нижние строки – ОТХ, Э = 18,1 кВт/т)

Показатели	i_t / Номер передачи				
	38,9988 1	34,06542 2	29,7562 3	25,9920 4	22,7040 5
	Значения показателей				
n_e , мин ⁻¹	2300 2320	2214 2300	2146 2194	2147 2142	2184 21565
ε_N	1,000 0,908	0,998 1,000	0,995 0,997	0,995 0,994	0,997 0,995
ε_M	1,000 0,900	1,037 1,000	1,066 1,045	1,066 1,068	1,050 1,062
$P_{кр}$, кН	36,013 36,038	32,158 34,834	28,384 31,387	24,166 27,476	20,116 23,226

Продолжение таблицы 5

Показатели	i_t /Номер передачи				
	38,9988 1	34,06542 2	29,7562 3	25,9920 4	22,7040 5
	Значения показателей				
v_r , км/ч	8,00 8,07	8,82 9,16	9,78 10,00	11,20 11,18	13,05 12,88
v , км/ч	7,67 7,73	8,56 8,83	9,53 9,72	10,96 1090	12,93 12,62
$N_{кр}$, кВт	76,708 77,419	76,451 85,397	75,162 84,755	73,580 83,185	72,261 81,451
η_r	0,7600 0,7599	0,7589 0,7610	0,7487 0,7573	0,7329 0,7455	0,7182 0,7293
δ , %	4,2 4,2	2,9 3,6	2,6 2,8	2,2 2,5	0,9 2,0
$g_{кр}$, (г/ч)/кВт	259 260	257 259	258 257	264 259	270 265
G_{φ} , кг/ч	19,884 20,120	19,629 22,107	19,391 21,750	19,394 21,542	19,528 21,600
$G_{гп}$, (кг/ч)/кВт	0,294 0,296	0,307 0,314	0,326 0,328	0,364 0,356	0,425 0,408
k_p , кВт	67,530 67,913	64,035 70,429	59,433 66,258	53,239 60,427	45,997 52,908
$g_{кpo}$, (г/кВт·ч)/кВт	3,839 3,827	4,010 3,676	4,341 3,873	4,951 4,286	5,875 5,012

Таблица 6

Сравнительные показатели эффективности тракторов

Ξ , кВт/т	k_p , кВт	$g_{кpo}$, (г/кВт·ч)/кВт	$G_{гп}$, (кг/ч)/кВт	m_{η}	σ_{η}	λ_{η} , %
К3						
17,2	56,296	5,788	0,474	0,59285	0,02041	3,44
23,1	70,644	4,565	0,484	0,60640	0,00349	0,57
К4						
17,25	64,854	5,129	0,515	0,58078	0,03001	5,16
23,1	87,495	3,695	0,489	0,60606	0,00395	0,65
Г3						
16,28	57,514	4,547	0,340	0,74374	0,01605	2,15
18,1	63,261	4,108	0,338	0,75060	0,01190	1,58

Таблица 7

Показатели эффективности ОТХ по сравнению с МТХ

Показатели эффективности ОТХ по сравнению с МТХ:	К3	К4	Г3
повышение производительности, k_p , %	25,4	34,9	10,0
снижение относительного расхода топлива, $g_{кpo}$, %	-21,1	-27,9	-9,6
снижение неравномерности изменения η_r по передачам, λ_{η} , %	-83,4	-87,4	-26,5

Выводы

1. Оптимальная тяговая характеристика соответствует минимальной эксплуатационной массе трактора и его максимальной энергонасыщенности.

2. Максимальная энергонасыщенность трактора одинакова для всех тяговых классов и определяется расчетом тяговой характеристики на передаче, на которой достигаются максимумы коэффициента производительности, тяговой мощности и тягового КПД.

3. Трактор с оптимальной тяговой характеристикой по сравнению с другим ее вариантом обеспечивает более высокую производительность машинно-тракторного агрегата с меньшим относительным (на единицу производительности) расходом топлива.

Литература

1. Самсонов В.А., Лачуга Ю.Ф. Расчет максимальной энергонасыщенности сельскохозяйственного трактора // Тракторы и сельхозмашины. 2017. № 10. С. 36–41.
2. Кутьков Г.М. Тракторы и автомобили. Теория и технологические свойства. М.: КолосС, 2004. 504 с.
3. Скотников В.А., Машенский А.А., Солонский А.С. Основы теории и расчета трактора и автомобиля. М.: Агропромиздат, 1986. 384 с.
4. Описание основных узлов и технические характеристики трактора К-424 «Кировец». Режим доступа: http://kirovets-ptz.com/rus/i_dc1/ci_i/63/informatsiya_pro_k-4f__1_.pdf.
5. Двигатели ЯМЗ-536, ЯМЗ-5361, ЯМЗ-5362, ЯМЗ-5363, ЯМЗ-5364, их модификации и комплектации. Руководство по эксплуатации / Под ред. Н.Л. Шамалья. Ярославль: ОАО «Автотизель», 2013. 240 с.

References

1. Samsonov V.A., Lachuga Yu.F. Calculation of the maximum energy saturation of an agricultural tractor. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2017. No 10, pp. 36–41 (in Russ.).
2. Kut'kov G.M. *Traktory i avtomobili. Teoriya i tekhnologicheskie svoystva* [Tractors and automobiles. Theory and technological properties]. Moscow: KolosS Publ., 2004. 504 p.
3. Skotnikov V.A., Mashchenskiy A.A., Solonskiy A.S. *Osnovy teorii i rascheta traktora i avtomobilya* [The fundamentals of the theory and calculation of the tractor and automobile]. Moscow: Agropromizdat Publ., 1986. 384 p.
4. *Opisanie osnovnykh uzlov i tekhnicheskie kharakteristiki traktora K-424 «Kirovets»* [Description of the main components and technical characteristics of the tractor K-424 «Kirovets»]. URL: http://kirovets-ptz.com/rus/i_dc1/ci_i/63/informatsiya_pro_k-4f__1_.pdf.
5. *Dvigateli YaMZ-536, YaMZ-5361, YaMZ-5362, YaMZ-5363, YaMZ-5364, ikh modifikatsii i komplektatsii* [Engines YaMZ-536, YaMZ-5361, YaMZ-5362, YaMZ-5363, YaMZ-5364, their modifications and configuration]. *Rukovodstvo po ekspluatatsii*. Pod red. N.L. Shamalya. Yaroslavl': ОАО «Avtodizel'» Publ., 2013. 240 p.