

УДК 630*375.4

**ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПОНЕНТ ЧАСОВОГО РАСХОДА ТОПЛИВА ДИЗЕЛЯ
ЛЕСОХОЗЯЙСТВЕННОГО МАШИННО-ТРАКТОРНОГО АГРЕГАТА
В РЕЖИМЕ ПАХОТЫ**

**Мартынов Б. Г., проф., д.т.н., Михайлов О. А., доц., к.т.н., Спиридонов С. В., доц., к.т.н.,
Дурманов М. Я., ст. преп.**

Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова
(Санкт-Петербург, Россия), e-mail: lesbisnes@mail.ru; kerro07@mail.ru; svslta@yandex.ru;
PSLM218@yandex.ru

**RESEARCH OF COMPONENTS OF HOURLY FUEL CONSUMPTION OF DIESEL OF
A FORESTRY MACHINE-TRACTOR UNIT IN THE MODE OF PLOWING**

**Martynov B. G., Prof., D.Sc., Mikhaylov O. A., Assoc. Prof., PhD,
Spiridonov S. V., Assoc. Prof., PhD, Durmanov M. Ya., senior lecturer**

S.M. Kirov Saint Petersburg State Forest Technical University
(St. Petersburg, Russian Federation)

Аннотация. Для повышения качества проектных и конструкторских работ, совершенствования конструкции лесохозяйственного машинно-тракторного агрегата (МТА) необходима разработка и практическое использование различных методик оценки эксплуатационной эффективности МТА, особенно актуальная на этапе проектирования трактора. В работе исследуется влияние компонент часового расхода топлива дизеля на показатель суммарного расхода на динамические нагрузки, характерные для неустановившихся режимов функционирования лесохозяйственного МТА. Для пахотного режима определен часовой расход топлива дизеля на динамические нагрузки по компонентам: от сопротивления на подъеме; от динамики отброса пласта плугом; от инерционных сил МТА; от колебаний подвеса МТА в продольно-вертикальной плоскости; от механических потерь в парах трения двигателя, а также его суммарная величина для различных значений жесткости подвеса. Оценка значений указанных компонент возможна еще на стадии проектирования трактора и орудий, агрегатируемых с ним, при построении поверхности состояния частотной характеристики (ЧХ) часового расхода топлива дизеля МТА и использовании метода сечений ЧХ. Исследование показало, что максимальные значения суммарной динамической составляющей часового расхода топлива в пахотном режиме наблюдаются на частотах, близких к $2,5 \text{ с}^{-1}$, – собственной, энергозатратной частоте колебаний частоты вращения коленчатого вала двигателя СМД-20Т.04.

Ключевые слова: машинно-тракторный агрегат; часовой расход топлива; дизель; компоненты часового расхода топлива; метод сечений; частотные характеристики

Abstract. To improve the quality of design and construction work, to improve the design of a forestry machine-tractor unit (MTU), it is necessary to develop and use various methods for evaluating the operational efficiency of MTU, especially relevant at the stage of tractor design. The paper examines the influence of the components of hourly diesel fuel consumption on the indicator of total consumption for dynamic loads characteristic of non-stable modes of operation of the forestry MTU. For arable regime determined by hourly fuel consumption of a diesel engine dynamic load components: resistance on the rise; from the dynamics of the garbage layer plow; from the inertial forces of the MTU; from fluctuations in the suspension of MTU in a longitudinal vertical plane; from mechanical losses in friction pairs of the engine, as well as its total value for different values of the stiffness of the suspension. Evaluation of the values of these components is possible even at the design stage of the tractor and tools aggregated with it, when constructing the surface of the state of frequency characteristics (FC) of the hourly fuel consumption of MTU diesel and using the FC cross-section method. The study showed that the max-

imum values of the total dynamic component of the hourly fuel consumption in the arable mode are observed at frequencies close to 2.5 s^{-1} – the natural, energy-consuming frequency of oscillation of the engine's crankshaft speed SMD-20T. 04.

Key words: Machine and tractor unit; Hourly fuel consumption; Diesel engine; Components of hourly fuel consumption; Cross section method; Frequency characteristics

Введение. Оценка часового расхода топлива дизеля МТА по компонентам при неустановившихся режимах функционирования важна на этапе проектирования трактора и определении параметров лесохозяйственных почвообрабатывающих машин, используемых в агрегате с трактором [1-3]. Часовой расход топлива определяет эксплуатационные затраты МТА и стоимость лесохозяйственных и лесовосстановительных работ. Построение поверхности состояния частотной характеристики (ЧХ) часового расхода топлива дизеля МТА и использование метода сечений ЧХ позволяют оценить экстремальные значения его компонент: от сопротивления на подъеме; от динамики отброса пласта плугом; от инерционных сил МТА; от колебаний подвеса МТА в продольно-вертикальной плоскости; от механических потерь в парах трения двигателя, а также его суммарную величину для различных значений жесткости подвеса и скорости движения МТА [4,5].

Задача исследования заключается в выявлении резонансных частот колебаний частоты вращения коленчатого вала двигателя, соответствующих наибольшему энергозатратам и расходу топлива, вследствие несоответствия динамических характеристик дизеля и силовой передачи МТА.

Материалы и методы. Основными внешними воздействиями в моделях функционирования МТА являются: профиль поверхности вырубki, задаваемый корреляционной функцией и спектральной плотностью; факторы разнообразия физико-механических свойств почвы; скорость движения. Моделируется неустановившейся характер сил сопротивления движению МТА, описываемый эргодическим стационарным случайным процессом, для всего спектра частот входного момента нагрузки. В работе рассматривается пахотный режим работы трактора ЛХТ-100 с плугом ПКЛ-70 на легких и тяжелых почвах. Методика вычислений описана ниже.

Анализ компонент часового расхода топлива дизеля МТА в пахотном режиме
Критериальная функция (1) [1-3,5]

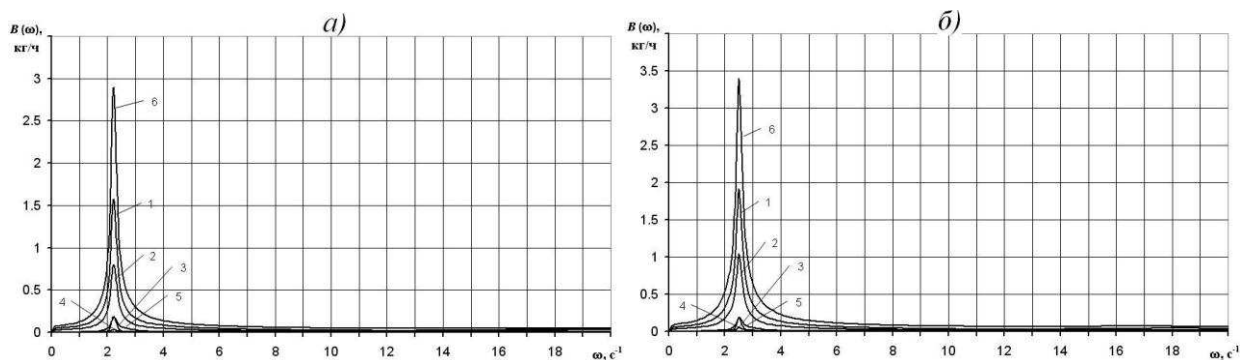
$$B^n(\omega) = E_1 \cdot M_n^a \cdot \omega \cdot |U_{11}(j\omega)| \left\{ \frac{R}{i_t \eta_m} [A_1^n + A_2 + 3A_3 |U_{11}^2(j\omega)| + 2f_{\text{тк}} \cdot |\Theta_{\text{в}}^n(j\omega)| + 2A_4 \omega \cdot |U_{11}(j\omega)|] + D_1 \cdot \left[\frac{a_1}{P_{\text{мн}}} \sqrt{\frac{4\omega^2 + \gamma^2}{\omega^2 + \gamma^2}} \cdot |G_{61}(j\omega)| + 2b_1 \omega \cdot |U_{11}(j\omega)| \right] \right\}, \quad (1)$$

где $E_1 = \frac{3,6\pi}{30\eta_i H_u}$; $A_1^n = mg \sin \alpha + f_{\text{тк}} m_{\text{т}} g \cos \alpha$; $A_2 = f_{\text{тк}} m_{\text{пл}} g \cos \alpha + k_{\text{п}} ab$;

$$A_3 = \left(\frac{\pi R}{30i_t} \right)^2 \xi ab; \quad A_4 = \frac{\pi R}{30i_t} m; \quad D_1 = \frac{V_{\text{цд}} i}{\pi \tau_{\text{д}}},$$

позволяет построить поверхность состояния ЧХ часового расхода топлива дизеля и вычислить составляющие часового расхода топлива.

Выполняя сечения поверхности состояния ЧХ часового расхода топлива дизеля МТА в продольно-вертикальной плоскости (рисунки 1 и 2) при любом фиксированном значении регулярной скорости v_0 движения МТА и по всему диапазону частот ω колебаний нагрузки на ведущих звездочках можно вычислить регулярную составляющую B_0^n и динамическую составляющую часового расхода топлива $B^n(\omega)$ [1–3, 5].

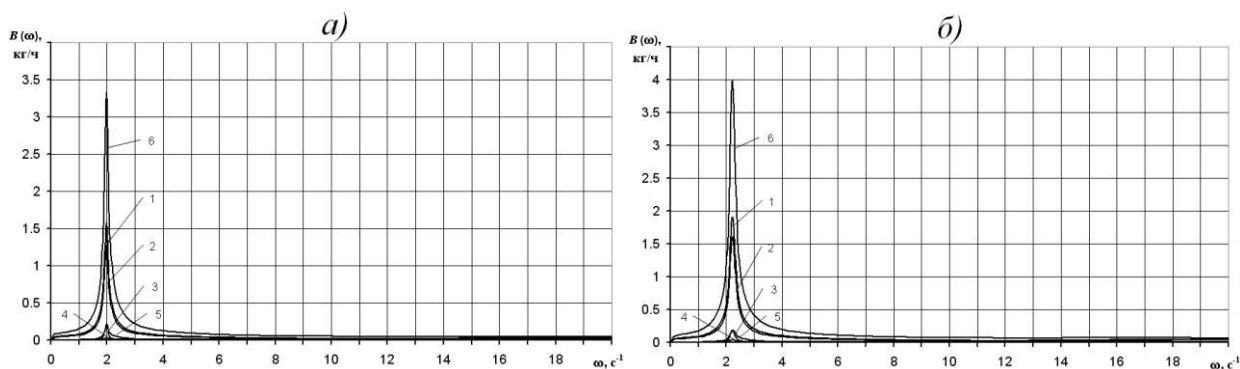


a – при скорости движения $v_0=0,86$ м/с (*II* передача);

б – при скорости движения $v_0=1,15$ м/с (*III* передача);

1 – сопротивление движению МТА на подъеме; 2 – подрезание и отброс пласта плугом; 3 – инерционные силы МТА; 4 – колебания трактора в продольно-вертикальной плоскости; 5 – механические потери в парах трения двигателя; 6 – суммарный расход на динамические нагрузки

Рисунок 1 – ЧХ часового расхода топлива по компонентам в режиме пахоты легкого грунта МТА на базе трактора ЛХТ-100 с плугом ПКЛ-70 при жесткости подвеса $c_1=1400$ кН/м



a – при скорости движения $v_0=0,67$ м/с (*I* передача);

б – при скорости движения $v_0=0,86$ м/с (*II* передача)

Рисунок 2 – ЧХ часового расхода топлива по компонентам в режиме пахоты тяжелого грунта МТА на базе трактора ЛХТ-100 с плугом ПКЛ-70 при жесткости подвеса $c_1=1400$ кН/м (обозначения те же, что на рисунке 1)

Для режимов пахоты легкого и тяжелого грунта, согласно выражению (1), вычислены потери часового расхода топлива по каждой компоненте динамической составляющей в спектре частот $0...20$ s^{-1} (рисунки 1 и 2), а также величина динамической составляющей для различных значений $c_1=1800, 1400, 1000$ кН/м:

1 – от сопротивления на подъеме с плугом

$$B_1^{\text{п}}(\omega) = \frac{E_1 R \cdot M_{\text{н}}^a}{i_{\text{т}} \eta_{\text{м}} \omega_{\text{сн}}} \cdot \int_{\omega=0}^{\omega=20} \omega |U_{11}(j\omega)| \cdot [A_1^{\text{п}} + A_2 + 3A_3 \cdot |U_{11}^2(j\omega)|] d\omega; \quad (2)$$

2 – от динамики сопротивления плуга (подрезания и отброса пласта)

$$B_2^{\text{п}}(\omega) = \frac{E_1 R \cdot M_{\text{н}}^a}{i_{\text{т}} \eta_{\text{м}} \omega_{\text{сн}}} \cdot \int_{\omega=0}^{\omega=20} \omega |U_{11}(j\omega)| \cdot [A_2 + 3A_3 \cdot |U_{11}^2(j\omega)|] d\omega; \quad (3)$$

3 – от колебаний подвеса МТА в продольно-вертикальной плоскости

$$B_3^n(\omega) = \frac{2E_1 R \cdot f_{\text{тк}} \cdot M_{\text{н}}^a}{i_{\text{т}} \eta_{\text{м}} \omega_{\text{сн}}} \cdot \int_{\omega=0}^{\omega=20} \omega |U_{11}(j\omega)| \cdot |\Theta_{\text{в}}^n(j\omega)| d\omega; \quad (4)$$

4 – от инерционных сил МТА

$$B_4^n(\omega) = \frac{2E_1 R \cdot M_{\text{н}}^a}{i_{\text{т}} \eta_{\text{м}} \omega_{\text{сн}}} A_4 \cdot \int_{\omega=0}^{\omega=20} \omega^2 |U_{11}^2(j\omega)| d\omega; \quad (5)$$

5 – от механических потерь в парах трения двигателя

$$B_5^n(\omega) = \frac{E_1 D_1 \cdot M_{\text{н}}^a}{\omega_{\text{сн}}} \cdot \int_{\omega=0}^{\omega=20} \omega |U_{11}(j\omega)| \cdot \left[\frac{a_1}{P_{\text{мн}}} \sqrt{\frac{4\omega^2 + \gamma^2}{\omega^2 + \gamma^2}} \cdot |G_{61}(j\omega)| + 2b_1 \omega \cdot |U_{11}(j\omega)| \right] d\omega; \quad (6)$$

Суммарные потери часового расхода топлива на динамические нагрузки в спектре частот $0 \dots 20 \text{ с}^{-1}$ при различных значениях $c_1 = 1800; 1400; 1000 \text{ кН/м}$

$$B^n(\omega) = \frac{M_{\text{н}}^a}{\omega_{\text{сн}}} \cdot \int_{\omega=0}^{\omega=20} |G_{31}^n(j\omega)| \cdot d\omega. \quad (7)$$

где $\omega_{\text{сн}}$ – собственная низшая частота колебаний МТА; $G_{31}^n(j\omega)$ – передаточная функция часового расхода топлива в пахотном режиме [5].

Фактический часовой расход топлива $B_{\text{ф}}^n$ в пахотном режиме, с учетом потерь на динамические нагрузки, для различных значений $c_1 = 1800; 1400; 1000 \text{ кН/м}$, определится суммой

$$B_{\text{ф}}^n = B_0^n + B^n(\omega). \quad (8)$$

Результаты. Результаты вычисления (2)–(8) при функционировании МТА в пахотном режиме сведены в таблицы 1 и 2 [2, 3].

Таблица 1 – Результаты расчета часового расхода топлива МТА на базе трактора ЛХТ-100 с плугом ПКЛ-70 в режиме пахоты легких грунтов

Скорость движения МТА v_0 , м/с	Регулярная составляющая B_0^n , кг/ч	Суммарные динамические составляющие $B^n(\omega)$, кг/ч при различной жесткости c_1 , кН/м			Компоненты динамической составляющей $B_i^n(\omega)$, кг/ч при жесткости $c_1 = 1400 \text{ кН/м}$				
		1000	1400	1800	1 ^с	2 ^с	3 ^с	4 ^с	5 ^с
0,86 ^а	10,507	1,133	1,140	1,138	0,598	0,327	0,023	0,142	0,050
1,15 ^б	14,086	1,402	1,411	1,408	0,748	0,409	0,022	0,180	0,052

^а $\omega_{\text{сн}} = 2,23 \text{ с}^{-1}$ – II передача ($i_{\text{т}} = 44,226$);

^б $\omega_{\text{сн}} = 2,51 \text{ с}^{-1}$ – III передача ($i_{\text{т}} = 32,854$);

^с Компоненты: 1 – сопротивление движению МТА на подъеме; 2 – подрезание и отброс пласта плугом; 3 – инерционные силы МТА; 4 – колебания трактора в продольно-вертикальной плоскости; 5 – механические потери в парах трения двигателя.

Таблица 2 – Результаты расчета часового расхода топлива МТА на базе трактора ЛХТ-100 с плугом ПКЛ-70 в режиме пахоты тяжелых грунтов

Скорость движения МТА v_0 , м/с	Регулярная составляющая B_0^n , кг/ч	Суммарные динамические составляющие $B^n(\omega)$, кг/ч при различной жесткости c_1 , кН/м			Компоненты динамической составляющей $B_i^n(\omega)$, кг/ч при жесткости $c_1 = 1400$ кН/м				
		1000	1400	1800	1 ^с	2 ^с	3 ^с	4 ^с	5 ^с
0,67 ^а	11,709	1,264	1,272	1,269	0,573	0,479	0,023	0,151	0,046
0,86 ^б	15,046	1,578	1,588	1,584	0,721	0,603	0,024	0,190	0,050

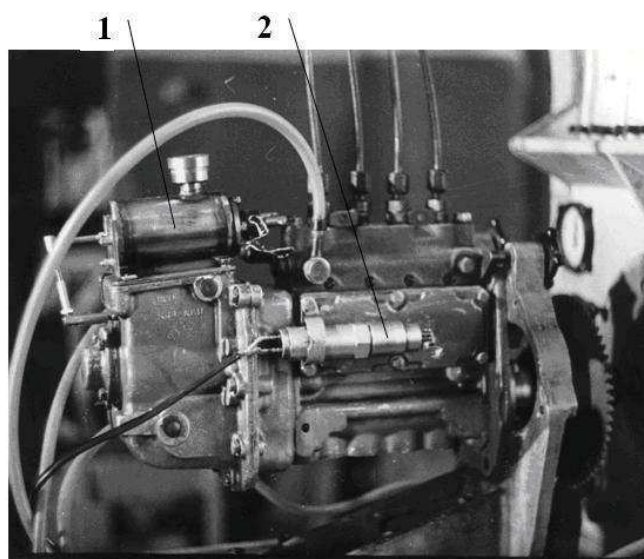
$$^a \omega_{\text{сн}} = 1,99 \text{ с}^{-1} - I \text{ передача } (i_{\dot{\delta}}=56,651);$$

$$^b \omega_{\text{сн}} = 2,23 \text{ с}^{-1} - II \text{ передача } (i_{\dot{\delta}}=44,226);$$

Заключение. В режиме пахоты легких и тяжелых грунтов частотная характеристика часового расхода топлива МТА на динамические нагрузки реализуется с одним экстремумом (рисунки 1 и 2, кривая 6). Наибольший расход происходит в диапазоне частот $1,99-2,51 \text{ с}^{-1}$, при собственной частоте колебаний частоты вращения коленчатого вала двигателя $\omega_c = 2,5 \text{ с}^{-1}$. По компонентам динамической составляющей наибольшие значения расхода топлива имеют компоненты сопротивления движению МТА на подъеме и подрезания и отброса пласта плугом (рисунки 1 и 2, кривые 1, 2).

Скорость движения v_0 оказывает существенное влияние как на величину регулярной составляющей часового расхода топлива B_0^n , так и на компоненты динамической составляющей $B_i^n(\omega)$ (таблицы 1 и 2), поэтому выбор передаточного ряда трансмиссии и коробки перемены передач на стадии проектирования должен обеспечивать эффективные тяговые и скоростные режимы МТА.

Заглубленное положение плуга в пахотном режиме ограничивает перемещение задней каретки трактора и амплитуду колебаний в продольно-вертикальной плоскости, поэтому варьирование жесткости подвеса не оказывает существенного влияния на суммарные динамические составляющие $B^n(\omega)$ часового расхода топлива.



1 – гаситель колебаний РТН; 2 – датчик перемещения РТН

Рисунок 3 – ТНВД типа ЛСТН-49010 с гасителем колебаний РТН и датчиками, установленный на испытательном стенде

Для повышения топливной экономичности дизелей МТА, в конструкцию ТНВД которых входит рейка топливного насоса (РТН), необходимо использовать корректирующее устройство.

В качестве корректирующего устройства целесообразно использовать гаситель колебаний РТН (рисунок 3). Гаситель колебаний вводится в конструкцию ТНВД для уменьшения амплитуды колебаний рейки и отрицательного действия гидродинамической силы на качество процесса регулирования скорости. Его демпфирующие свойства снижают действие гидродинамической силы при отсечке топлива и оказывают сопротивление при перемещении РТН в сторону увеличения цикловой подачи топлива [4-6].

Благодарность. Авторы выражают глубокую благодарность доценту Антипину Валерию Петровичу и к.т.н. Каршеву Геннадию Владимировичу за неоценимую помощь в процессе работы над рукописью статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дурманов М.Я., Спиридонов С.В., Михайлов О.А. Оценка часового расхода топлива лесохозяйственного машинно-тракторного агрегата на стадии проектирования / Леса России: политика, промышленность, наука, образование / материалы третьей международной научно-технической конференции. Том 2 / Под. ред. В.М. Гедьо. - СПб.: СПбГЛТУ, 2018. – С.164-167.

2. Martynov B. G., Spiridonov S. V., and Durmanov M. Ya. Influence of the parameters of a forestry machine-tractor unit on the hourly fuel consumption of a diesel engine IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 316 (2019) 012035 IOP Publishing doi:10.1088/1755-1315/316/1/012035

3. Дурманов М.Я., Мартынов Б.Г., Спиридонов С.В. Исследование часового расхода топлива дизеля лесохозяйственного машинно-тракторного агрегата при пахоте тяжелых грунтов / Сборник статей по материалам научно-технической конференции института технологических машин и транспорта леса по итогам научно-исследовательских работ 2018 года [Электронный ресурс] / отв. ред. В.А. Соколова - СПб: СПбГЛТУ, 2019. – С.214-225. DOI: 10.21266/SPBFTU.2019.NTK.1

4. Антипин В. П. Энергозатраты машинно-тракторного агрегата. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 324 с.

5. Антипин В.П. Производительность, энергозатраты и ресурс машинно-тракторного агрегата / В. П. Антипин, М. Я. Дурманов, Г. В. Каршев – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2017. – 484 с.

6. Антипин В. П., Грибов С. А., Шевцов А. А., Козлов А. В., Кристаль М. Е. Регулятор скорости прямого действия двигателя внутреннего сгорания. А.с. №1276843; опубл. 15.12.86. – Бюл. №46, 1986.