

## ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧИЙ РЕЖИМ РУХУ ТРАКТОРНОГО АГРЕГАТУ НА ГОНІ

**Лебедєв А.Т., д.т.н., проф.**

*Харківський національний технічний університет сільського господарства  
імені Петра Василенка*

**Лебедєв С.А., к.т.н.**

*Харківська філія НДІПВТ імені Леоніда Погорілого*

**Погорілий В.В., заступник директора з наукової роботи та випробувальної  
діяльності**

*УкрНДІПВТ імені Леоніда Погорілого*

*Обґрунтовано твердження про мінімальну витрату палива тракторним агрегатом при русі на гоні з постійною швидкістю.*

**Вступ.** Енергетична ефективність тракторних агрегатів нерозривно пов'язана із забезпеченням їх роботи на економічних режимах при мінімальній витраті палива. У зв'язку з цим, напрям досліджень по обґрунтуванню оптимального по економічності режиму руху тракторного агрегату на гоні є важливою науково-технічною проблемою.

**Аналіз основних досліджень і публікацій.** У основу відомих досліджень [1,2] енергетичного аналізу тракторного агрегату при виконанні різних технологічних процесів покладені прямі паливо-енергетичні витрати і імовірнісний характер навантаження. Дана методика обґрунтування оптимальних швидкостей руху тракторного агрегату передбачає виконання великого об'єму експериментальних робіт і не дозволяє оцінити його енергетичний баланс з врахуванням енергетичного потенціалу агрегату. На необхідність обліку даних складових при енергетичному аналізі сільськогосподарських агрегатів звертається увага в роботах [3, 4].

**Мета дослідження.** Мета дослідження передбачає обґрунтування оптимального режиму руху тракторного агрегату на гоні, що забезпечує мінімум витрати палива.

**Результати дослідження.** Виконання тракторним агрегатом технологічної операції пов'язане з великими витратами енергії, яка витрачається як безпосередньо на виконання самої технологічної операції, так і на динамічні процеси, що виникають в системі «трактор-знаряддя». В даному випадку рівняння руху тракторного агрегату можна записати у вигляді [5]

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{m_m v^2}{2} \right) + R_c v = \eta_m N_e, \quad (1)$$

де:  $m_m$  – маса тракторного агрегату (трактор – робоче знаряддя), кг;

$v$  – швидкість руху, м/с;  
 $R_c$  – сила опору руху, Н;  
 $\eta_m$  – тяговий ККД трактора;  
 $N_e$  – номінальна потужність двигуна, кВт.

Перша складова даного рівняння характеризує несталий режим руху агрегату (розгін, повороти і т.д.), друга – сталий, визначається опором руху агрегату при певній швидкості.

З достатнім ступенем точності можна прийняти  $\eta_m = const$  для певної швидкості руху тракторного агрегату, а  $R_c$  залежна, з одного боку, від технологічного процесу, рельєфу поля і т.д.; з іншого боку, вона квадратично залежить, наприклад при агрегуванні трактора з ґрунтообробними машинами, від швидкості руху, тобто

$$R_c = R_c(\ell) + \kappa v + \kappa_1 v^2, \quad (2)$$

де:  $\ell$  – поточне значення шляху, пройденого тракторним агрегатом на гоні від початку руху ( $d\ell/dt = v$ );

$R_c(\ell)$  – складова сили опору руху, що не залежить від швидкості агрегату і є функцією від  $\ell$ ;

$\kappa, \kappa_1$  – постійні коефіцієнти.

В даному випадку рівняння (1) у функції  $\ell$  з врахуванням (2) у відносних одиницях записується в безрозмірному вигляді:

$$\ell'' \ell' + r_c(\ell) \ell' + \kappa \ell^2 + \kappa_1 \ell^3 = \eta_m p, \quad (3)$$

де:  $\ell', \ell''$  – швидкості і прискорення агрегату на певній ділянці гону;

$r_c$  – опір руху;

$p$  – потужність двигуна.

При допущенні, що витрата палива  $q$  двигуном є лінійною функцією потужності, справедливо

$$q = p + a, \quad (4)$$

де:  $a$  – постійна величина.

При проходженні тракторним агрегатом довжини гону  $\ell$  за час  $T$  витрата палива двигуном трактора рівна інтегралу:

$$G = \int_0^m q dt = \frac{1}{\eta} \int_0^m (\ell'' \ell' + r_c(\ell) \ell' + \kappa \ell^2 + \kappa_1 \ell^3) dt + \int_0^m a dt. \quad (5)$$

Для визначення оптимального закону управління на гоні тракторним агрегатом для забезпечення мінімальної витрати палива досить знайти функцію  $\ell(t)$ , що доставляє мінімум функціоналу

$$I = \int_0^m \left[ \ell'' \ell' + r_c(\ell) \ell' + \kappa \ell^2 + \kappa_2 \ell^3 \right] dt \quad (6)$$

Шукана функція  $\ell(t)$  повинна задовольняти наступним обмеженням:

-  $\ell'' \leq \ell''_{\max}$  – обмеження по максимальному прискоренню тракторного агрегату, що відображають умови роботи оператора і режими навантажень агрегату;

-  $\ell' \leq \ell'_{\max}$  – обмеження по максимальній швидкості, обумовлене в основному якістю виконання технологічного процесу;

-  $p \leq p_{\max}$  – обмеження по двигуну, що відображає можливе його перевантаження.

Подібні завдання вирішуються варіаційними методами [6], відповідно до яких рівняння екстремалей визначаються з рівняння Ейлера-Пуассона для функціонала (6)

$$\ell''(2\kappa + 6\kappa_1 \ell') = 0. \quad (7)$$

Дане рівняння розпадається на два рівняння  $\ell'' = 0$  і  $2\kappa + 6\kappa_1 \ell' = 0$ , рішеннями яких є  $v = const$ .

Отже, найменша витрата палива досягається при русі тракторного агрегату на гоні з постійною швидкістю.

Даний висновок справедливий для будь-якої залежності сили опору руху  $r_c$  від поточного значення шляху, тобто  $r_c(\ell)$  (члени, що містять функцію  $r_c$  в рівнянні Ейлера-Пуассона взаємно скорочуються).

Умова руху трактора з постійною швидкістю реалізується на більшості зарубіжних тракторів при застосуванні або багаторівневих двигунів (наприклад, фінські трактора Valtra (рис. 1), або двигунів постійної потужності, для яких характерний високий коефіцієнт запасу крутного моменту (відношення максимального моменту двигуна до номінального)).

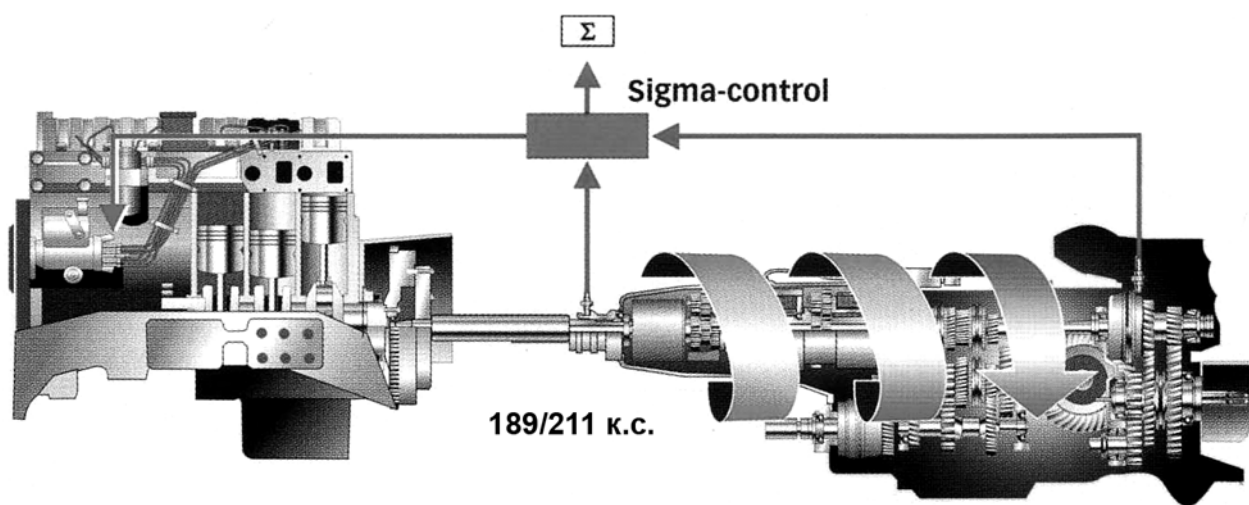


Рис. 1 – Загальний вигляд систем управління потужністю Sigma фінських тракторів Valtra [7].

Система управління потужністю Sigma-control за допомогою процесора управляє потужністю двигуна на тракторі Valtra на 174, 189 або 211 к.с.

Наприклад, під час руху на низькій передачі, коли тяга трактора з достатньою для даного агрегату при русі з постійною швидкістю, використовується менша потужність двигуна.

Однак, коли виникає необхідність передати додаткову потужність, наприклад до ВВП, автоматично здійснюється збільшення потужності двигуна.

На сучасних тракторах (Катерпіллер, Міцубісі, Кейс та ін.) встановлюють дво- і трирівневі дизелі: нижчий за потужністю (тяговий) рівень має згаданий високий запас крутного моменту, а вищий технологічний рівень – більшу на 20/25 % потужність з меншим запасом крутного моменту (8-12 %).

Це забезпечує рух тракторного агрегату з постійною швидкістю на змінному агрофоні (рис.2).

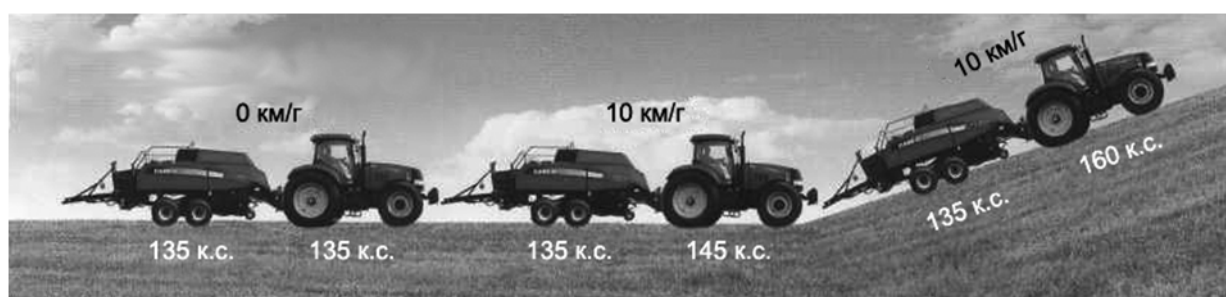


Рис. 2 – Автоматичне управління режимами роботи трактора Кейс для забезпечення роботи причіпних знарядь з приводом від ВВП.

Для двигуна постійної потужності (ДПП) характерний значний діапазон регулювання крутного моменту в області максимальних значень потужності і низьких питомих витрат палива.

Таблиця 1 – Параметри ДПП закордонних тракторів

Країна	Марка трактора	Потужність ДВЗ, кВт/к.с.	Оберти кол. вала, об/хв	Максимальний момент, Н·м	Запас крутного моменту (К), %
США	John Deer 7700	110/149	2100	670	42
	John Deer 7800	125/170	2100	775	44
	John Deer 8200	155/211	2200	942	39
	Challenger 35	156/212	2100	880	50
Німеччина	Steyr 9145 A	107/145	2300	576	30
	Steyr 8320	206/280	2400	1110	35
Англія	Favorit 515 C	110/149	2300	594	30
	Favorit 818	140/190	2200	808	33
	Favorit 824	169/230	2300	947	35
Італія	Fiatagri G 170 DT	125/170	2100	820	44
	Fiatagri G 190 DT	140/190	2100	888	40
Фінляндія	Valmet 8550	118/160	2200	650	27

*Примітка.* Запас крутного моменту двигунів тракторів серії ЮМЗ-80, МТЗ-180, ХТЗ-170 та ХТЗ-181: Д-240 – 20% , Д-260 – 24%, ЯМЗ-236 ДЗ – 15% і

ЯМЗ-238 КМ2 – 14%.

Ефективність застосування ДПП на тракторі залежить від рівня його постійної (максимальної) потужності і коефіцієнта запасу крутного моменту, від характеристики і параметрів трансмісії, що визначають її погоджувальні і регулюючі властивості. На вибір цих характеристик і параметрів переважно впливають такі чинники: регулюючі і енергетичні можливості ДПП, навантажувальне і перетворюючі властивості трансмісії, призначення та умови роботи трактора.

Узгодження параметрів ДПП та механічної ступеневої трансмісії (МСТ) сільськогосподарських тракторів полягає у виборі максимальної (постійної) потужності і коефіцієнта запасу крутного моменту двигуна, чисельності та розподілу робочих передач в МСТ. При цьому визначальними є умови роботи трактора, а для сільськогосподарського трактора загального призначення – умови його роботи на енергоємних операціях. Вибір і оцінку параметрів ДПП і МСТ доцільно здійснювати на підставі і з урахуванням наступних характеристик:

- узагальненої або приватної ймовірнісної розподілу середніх навантажень трактора на енергоємних сільськогосподарських роботах;
- граничних технологічних швидкостей МТА на цих роботах ( $v_{\max} - v_{\min}$ );
- обмежень, пов'язаних з агрегуванням трактора з сільськогосподарськими машинами з активними робочими органами.

Графічна інтерпретація узгодження характеристики ДПП з характеристикою щільності розподілу приведених до його валу середніх моментів опорів  $M_o$  (рис. 3) – частина узгодження, яка відповідає вищій робочій передачу МСТ.

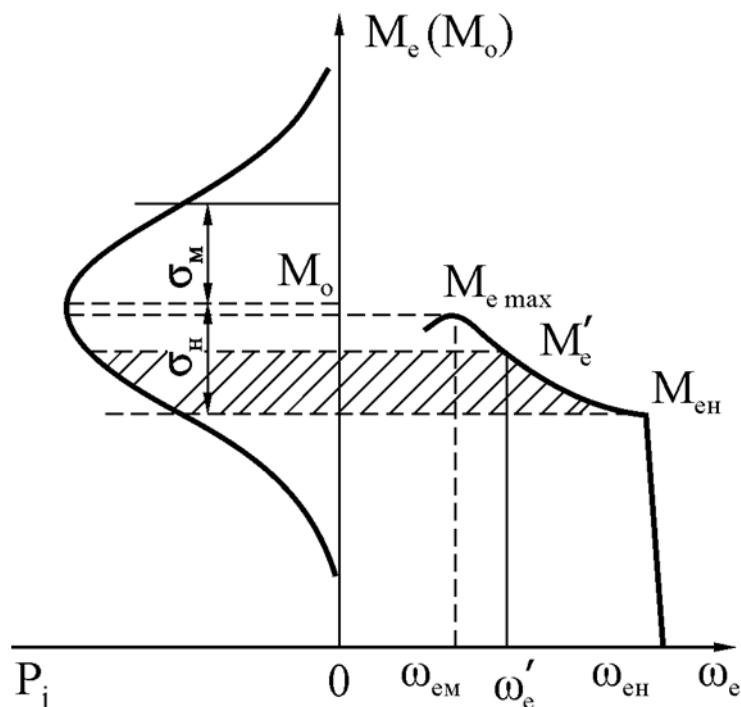


Рис. 3 – Узгодження характеристики  $M_e(\omega_e)$  та ймовірнісної характеристики середніх моментів опорів  $M_o(P_j)$ .

Зона коректорної ділянки характеристики ДПП  $M_{ен} \dots M_{е max}$  суміщена з частиною області щільності розподілу  $M_o$ , яка визначається  $2\sigma_m$  (де  $\sigma_m$  – середнє квадратичне відхилення  $M_o$ ). Відповідно до графіка узгодження максимальна (постійна) потужність ДПП розраховується за формулою:

$$N_{ен} = (\bar{M}_o - \sigma_m)\omega_{ен} = \bar{M}_o(1 - \nu_m)\omega_{ен}, \quad (8)$$

де:  $M_o$  і  $\nu_m$  – відповідно автоматичне очікування і коефіцієнт варіації щільності розподілу  $M_c$ ;

$\omega_{ен}$  – кутова швидкість вала ДПП на номінальному режимі, пов'язана з технологічною швидкістю руху МТА залежністю

$$\omega_{ен} = \frac{u_{mp}}{r_k} v_{max}, \quad (9)$$

де:  $u_{mp}$  – передаточне число трансмісії;

$r_k$  – радіус ведучого колеса трактора, м.

За узагальненої щільності розподілу  $M_o$  визначають число робочих передач. Для чого, враховуючи низькочастотні коливання поточних значень тягової навантаження, редуцируемої до вала двигуна, доцільно вибрати розрахунковий силовий інтервал ДПП  $M'_e - M_{ен}$  (заштрихована зона). Причому крутний момент ДПП

$$M_e = \frac{M_{е max}}{1 + \nu_k}, \quad (10)$$

де:  $\nu_k$  – коефіцієнт варіації щільності розподілу поточних значень  $M_o$ .

Число робочих передач

$$m_p = \frac{\ln D}{\ln K_m}, \quad (11)$$

де:  $D$  – діапазон середніх значень моментів опорів;

$$D \geq 2\sigma_m; \quad K_m = M'_e / M_{ен}. \quad (12)$$

Отриманий ряд робочих передач може бути уточнений на підставі приватних імовірнісних характеристик розподілу середніх навантажень, в тому числі властивих для певних сільськогосподарських районів (району) або для деяких енергоємних операцій [8].

Слід враховувати, що робочі передачі використовуються також при агрегуванні трактори загального призначення з сільськогосподарськими машинами, які вимагають фіксованих частот обертання (кутових швидкостей) ВВП: 540 або 1000 хв<sup>-1</sup>. Для цього необхідно, щоб двигун працював на регуляторному ділянці характеристики при мінімальному відхиленні кутових швидкостей від номінального значення. Ефективність роботи МТА на цих

режимах двигуна залежить від інтервалів  $\Delta u$  між передавальними числами суміжних ступенів. Для забезпечення в цих умовах високого використання потужності двигуна і високих середніх швидкостей руху не рекомендується вибирати інтервали  $\Delta u > 25\%$  [8].

**Висновки.** Найменша витрата палива досягається при русі тракторного агрегату на гоні з постійною швидкістю. Дана умова реалізується на більшості зарубіжних тракторів при застосуванні двигунів постійної потужності.

### Список використаних джерел

1. Методика энергетического анализа технологических процессов в сельскохозяйственном производстве / А.Н. Никифоров и др. – М.: РИЦ ВИМ, 1995. – 74 с.
2. Агеев Л.Е. Основы расчета оптимальных и допускаемых режимов работы машинно-тракторных агрегатов. – Л.: Колос, 1978. – 209 с.
3. Взоров Б.А., Молчанов К.К., Трепененков И.И. Снижение расхода топлива с.-х. тракторами путем оптимизации режимов работы двигателей // Тракторы и сельхозмашины. – 1985. - № 6. – С. 10-14.
4. Левцев А.П., Ерохин М.Н. Энергетический анализ динамических систем СХА // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2005. - № 7. – С. 19-21.
5. Барский И.Б., Анилович В.Я., Кутьков Г.М. Динамика трактора. – М.: Машиностроение, 1973. – 280 с.
6. Гельфанд Н.М., Фомин С.В. Вариационные исчисления. – М.: Физматгиз, 1961. – 238 с.
7. Трактори, мобільні навантажувальні машини / За ред. Кравчука В.І., Демидова О.А. – Дослідницьке: УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого. – 2010. – 176 с.
8. Анилович В.Я., Водолажченко Ю.Т. Конструирование и расчет сельскохозяйственных тракторов. – М.: Машиностроение, 1976. – 456 с.

### Аннотация

#### ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЙ РЕЖИМ ДВИЖЕНИЯ ТРАКТОРНОГО АГРЕГАТА НА ГОНЕ

Лебедев А., Лебедев С., Погорельый В.

*Обосновано утверждение о минимальном расходе топлива тракторным агрегатом при движении на гоне с постоянной скоростью.*

### Abstract

#### ENERGY-SAVING MODE OF MOTION OF THE TRACTOR UNIT ON THE RUT

A. Lebedev, S. Lebedev, V. Pogoreliy

*Substantiated allegations of minimum fuel consumption when driving the tractor unit on the rut with a constant velocity.*