

ОПТИМАЛЬНІ ЗМІНИ ТЯГОВОЇ ПОТУЖНОСТІ ТРАКТОРА

М. Шуляк, канд. техн. наук, доцент,
Харківський національний технічний університет
сільськогосподарства імені Петра Василенка,
Ю. Козлов,
Харківська філія УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого

Визначено режими функціонування трактора на довжині гону з мінімальними непродуктивними витратами.

Ключові слова: трактор, тягова потужність, розгін, гальмування, коливання моменту.

Вступ. Під час роботи двигуна в реальній експлуатації агрегатів відбувається зниження ефективної потужності через те, що моменти сил опору агрегату, приведені до колінчастого вала двигуна, завжди мають змінний (стохастичний) характер за частотою і амплітудою. Це викликає розузгодження в роботі систем і механізмів двигуна (повітро- і паливоподачі, випуску відпрацьованих газів та ін.). Експериментально доведено, що зниження потужності тим більше, чим більше динамічність зміни моменту опору на валу двигуна, зниження може досягати 20–30% номінальної потужності двигуна. Таким чином відбувається «недобір» потужності, як наслідок несталою (стохастичного) режиму роботи двигуна.

Аналіз основних публікацій. Для подолання короточасних опорів під час роботи МТА (різке збільшення опору робочих машин, рушання з місця і т.ін.) рекомендується при комплектуванні МТА частину потужності двигуна резервувати. Величина її залежно від виду технологічної операції і стану оброблюваного середовища може становити від 5 до 40% номінальної потужності. Таким чином, так звані внутрішні втрати потужності двигуна [1]:

$$N_B = N_{BCП} + N_c + N_P, \quad (1)$$

де $N_{BCП}$ – потужність, яка витрачається на приведення допоміжних механізмів і систем трактора, самохідної машини; N_c – втрати потужності на несталий (стохастичний) режим роботи двигуна; N_P – частина потужності двигуна, витрачена на резерв.

Фактичну потужність двигуна, яка може бути використана для тяги і приведення робочих органів машин, пересування агрегату із заданим швидкісним для навантаження режимом роботи, визначають з рівняння [1]:

$$N_e^{\phi} = N_e^H - \left(N_{BCП} + N_c + N_P \right), \quad (2)$$

Як видно зі схеми (рис. 1), залежно від виду мобільного агрегату (виду енергетичних потоків до робочих органів машин) фактична потужність від двигуна передається на його пересування і на: тягу робочих машин – тягові МТА; приведення робочих органів машин (через ВВП, гідромотори, електродвигуни, пневмодвигуни та ін.) – приводні МТА (самохідні комбайни, шасі та ін.); тягу машин і приведення їх робочих органів.

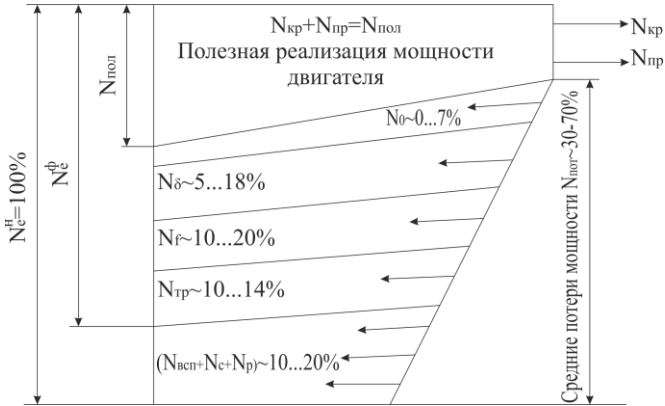


Рисунок 1 - Схема використання номінальної потужності двигуна під час роботи МТА

З урахуванням сил, що діють на МТА під час його руху, баланс потужності мобільних МТА в розгорненому вигляді запишемо так [1]:

$$N_e^H = N_{ВСП} + N_c + N_p + N_{TP} + N_f + N_\delta \pm N_a \pm N_w \pm N_j + N_{KP} + N_{PP}, \quad (3)$$

де N_{TP}, N_f, N_δ – витрати (втрати) потужності на приведення в дію механізмів трансмісії, пересування трактора або самохідної машини і буксування їх рушіїв, кВт; N_a, N_w, N_j – витрати (втрати) потужності на подолання сил опору: підйому трактора або самохідної машини, повітряного середовища, інерції, кВт; N_{KP} – корисні витрати на створення потужності тяговою (гаком), кВт; N_{PP} – витрати потужності на приведення робочих органів машин (ВВП, тягових модулів, генераторів енергії та ін.), кВт.

Втрата потужності внаслідок дії зовнішніх чинників:

$$N_{ПOT} = N_f + N_\delta \pm N_a \pm N_w \pm N_j. \quad (4)$$

У разі руху тракторного агрегату зі швидкістю менше ніж 10 км/год N_w можна нехтувати. Потужність тракторного агрегату, що працює по довжині гону на горизонтальній ділянці, як відомо, складається з потужностей: що витрачається на тягу машин-зрядь (N_{KP}), на

самопересування агрегату (N_f), на подолання сил інерції (N_j), на буксування (N_δ):

$$N_e^\phi = N_{KP} + N_f + N_j + N_\delta. \quad (5)$$

Основна частина. Складові N_f, N_j, N_δ характеризують непродуктивні втрати потужності. Зменшення їх до мінімуму, під час роботи агрегату приведе до збільшення потужності для виконання корисної роботи (N_{KP}). Цю задачу можна розв'язати шляхом вибору оптимальних режимів зміни потужності тягового агрегату у функції часу під час розгону, сталого руху і гальмування. Для цього рівняння (5) зручно записати в безрозмірному вигляді:

$$N = \mu_c v + \mu_f v + v v' + k p^2, \quad (6)$$

де k – коефіцієнт пропорційності буксування трактора його силі тяги;

$$N = \frac{N_e}{N_{en}}; \quad \mu_c = \frac{\sum R}{\sum R_n}; \quad \mu_f = \frac{P_f}{P_{fn}}; \quad p = \frac{P_{KP}}{P_{KP.H}}; \quad v = \frac{V_p}{V_{p.H}} \quad \text{– безрозмірні}$$

одиниці відповідно потужності двигуна, опору машин-знарядь, опору пересуванню агрегату, тяги агрегату і швидкості, де $N_e, N_{en}, \sum R, \sum R_n, P_f, P_{fn}, P_{KP}, P_{KP.H}, V_p, V_{p.H}$ – відповідно поточні і номінальні значення потужності двигуна, опори машин-знарядь, опори пересуванню агрегату, тяги агрегату і швидкості.

Зазвичай довжина гону має цілком певне значення. Приймаючи за одиницю довжини гону шлях, прохідний тракторним агрегатом за час $\tau = T$ за номінальної швидкості, довжини гону у відносних одиницях запишемо у вигляді інтеграла:

$$S = \int_0^T v dt. \quad (7)$$

Тоді задачу про оптимальну зміну тягової потужності тракторного агрегату математично буде сформульовано так: знайти функції v і p ,

що доставляють мінімум інтегралу $\int_0^T N dt$ при заданому значенні інтеграла (3)

і граничних умовах $v \Big|_0^T = v \Big|_0^T = 0$ (для трактора із зупинкою при перемиканні передач), $v \Big|_0^T = v_1$ і $v \Big|_0^T = v_2$ (для трактора з безступінчастими трансмісіями і при перемиканні передач на ходу).

Це типова ізопериметрична задача варіаційного числення [2]. В даному випадку вона зводиться до знаходження мінімуму інтеграла

$$\int_0^T N d\tau = \int_0^T \mu_c v d\tau + \int_0^T \mu_f v d\tau + \int_0^T v v' d\tau + k \int_0^T p^2 d\tau. \quad (8)$$

Вважаючи з достатнім наближенням, що під час роботи тракторного агрегату по довжині гону опір машин-знарядь і опір коченню агрегату – величини постійні ($\mu_c = \mu_{c0} = const$; $\mu_f = \mu_{f0} = const$, де μ_{c0} μ_{f0} відповідно середні значення опору машин-знарядь і коченню агрегату), перші два члени рівняння (8) можна записати:

$$\int_0^T \mu_c v d\tau = \int_0^T \mu_{c0} v d\tau = \mu_{c0} \int_0^T v d\tau; \quad (9)$$

$$\int_0^T \mu_f v d\tau = \int_0^T \mu_{f0} v d\tau = \mu_{f0} \int_0^T v d\tau. \quad (10)$$

Розв'язання третього члена рівняння:

$$\int_0^T v v' d\tau = \frac{1}{2} (v_T^2 - v_0^2). \quad (11)$$

Таким чином, при прийнятих вище допущеннях витрати потужності на тягу машин-знарядь, на самопересування агрегату і на подолання його сил інерції не залежать від законів керування потужністю тягового агрегату і задача забезпечення мінімуму втраг потужності на непродуктивні витрати зводиться до забезпечення мінімуму інтеграла:

$$k \int_0^T p^2 d\tau. \quad (12)$$

Приймаючи до уваги, що $p = v_1 + \mu_c$, запишемо проміжну функцію для розв'язуваної задачі:

$$H = v_1 + \mu_c v + \lambda_0 v. \quad (13)$$

Рівняння Ейлера для неї має вигляд:

$$2v'' - \lambda_0 = 0, \quad (14)$$

де λ_0 – множник Лагранжа.

Розв'язання рівняння (14)

$$v = C_1 + C_2 \tau + \frac{\lambda_0}{4} \tau^2, \quad (15)$$

де для граничних умов $v|_{\tau=0} = v_1$, $v|_{\tau=T} = v_2$ постійні інтегрування дорівнюють:

$$C_1 = v_1; \quad (16)$$

$$C_2 = \frac{6 \cdot S - 4 \cdot v_1 \cdot T - 2 \cdot v_2 \cdot T}{T^2}; \quad (17)$$

$$\lambda_0 = \frac{24 \cdot S - 12 \cdot v_1 + v_2 \cdot T}{T}. \quad (18)$$

За нульових граничних умов $v|_{\tau=0} = v|_{\tau=T} = 0$ оптимальні залежності швидкості і тяги агрегату від часу відповідно мають вигляд:

$$v = \frac{6 \cdot S}{T^2} \left(\tau - \frac{\tau^2}{T} \right); \quad (19)$$

$$p = \mu_0 + \frac{6 \cdot S}{T^2} - \frac{12 \cdot S}{T^3} \tau. \quad (20)$$

Умова Лежандра для рівняння (14)

$$H_{vv'} = 2 > 0. \quad (21)$$

Отже, на екстремалях (15), (19) і (20) досягається мінімум витрат потужності на буксування.

Помноживши v і p , рівняння оптимальної зміни тягової потужності для випадку $v|_{\tau=0} = v|_{\tau=T} = 0$ і $\mu = \mu_0 = const$ запишемо так:

$$N = \frac{6 \cdot S}{T^2} \eta_T \left[\left(\mu + \frac{6 \cdot S}{T^2} - \frac{12 \cdot S}{T^3} \right) \tau - \frac{1}{T} \left(\mu_0 + \frac{6 \cdot S}{T^2} \right) \tau^2 + \frac{12 \cdot S}{T^2} \tau^3 \right]. \quad (22)$$

Таким чином, при зміні тягової потужності за законом кубічної параболи непродуктивні витрати тягової потужності трактора мінімальні і максимальна швидкість трактора може досягти значення

$$v_T = \frac{3}{2} \cdot \frac{S}{T}. \quad (23)$$

Зазвичай же швидкість поступального руху тракторного агрегату обмежується

$$v \leq v_0, \quad (24)$$

де v_0 – допустима швидкість тракторного агрегату на конкретній сільськогосподарській операції.

В цьому випадку оптимальна швидкість складається з екстремалів (розгін і гальмування) і меж області $v = v_0$ (рис. 2). Оскільки $H_{vv'} \neq 0$ згідно з рівнянням (22), то дотичні до екстремальної межі області співпадають, тобто в точках сполучення $v' = 0$, $p = \mu_0$.

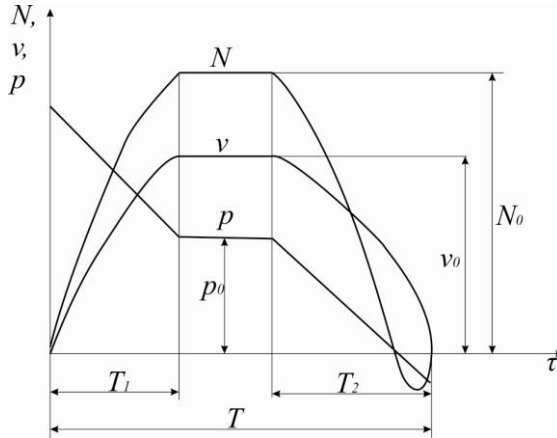


Рисунок 2 - Оптимальна зміна тягової потужності N , швидкості v і дотичної сили тяги p при $\mu = const$ і $v \leq v_0$

Оптимальний час розгону на початку і гальмування тракторного агрегату в кінці гону визначимо за умови $T_1 = T_2$. Інтегруючи швидкість трактора роздільно на ділянках, де $v \in \overset{\sim}{\mathcal{C}}$ – екстремаль і де $v \in \overset{\sim}{\mathcal{C}}$ проходить по межі області, отримаємо:

$$S = v_0 \cdot T - \frac{1}{3} v_0 \overset{\sim}{\mathcal{C}}_1 + T_2 \overset{\sim}{\mathcal{C}}. \quad (25)$$

Звідки

$$T_1 = T_2 = \frac{3}{2} \left(T - \frac{S}{v_0} \right). \quad (26)$$

Таким чином, при $\mu = \mu_0 = const$, $v \in \overset{\sim}{\mathcal{C}} \neq v \in \overset{\sim}{\mathcal{C}} \neq 0$, $v \leq v_0$ трактор буде працювати по довжині гону з мінімальними непродуктивними витратами, якщо при розгоні і гальмуванні його тягова потужність змінюється за законом кубічної параболи, а сила тяги – за лінійним законом. Час розгону і гальмування визначається за рівнянням (26). При досягненні заданого

значення швидкості оптимальним режимом роботи трактора буде режим постійної потужності.

Висновок. Наведені теоретичні положення були підтверджені експериментальним шляхом. Вивчалися способи руху трактора ХТА-200 на оранці, посіві і суцільній культивуванні. Щоб забезпечити оптимальний спосіб руху агрегату, здійснювали попередню розмітку ділянки: відзначали шляхи розгону і гальмування, на яких перемиканням передач і зміною швидкісного режиму роботи двигуна добивалися зміни тягової потужності трактора відповідно до рівняння (18). Результати досліджень показали, що при оптимальному способі руху підвищується економічність агрегату на 5-6% і продуктивність – на 3-5%.

Література

1. Костюченков Н.В. Эксплуатационные свойства мобильных агрегатов / Н.В. Костюченков, А.М. Плаксин; под ред. А.М. Плаксина. – Астана: КАТУ им. С. Сейфуллина, 2010. – 204 с.

Анотація

Определены режимы функционирования трактора на длине гона с минимальными непроизводительными затратами.

Summary

Tractor operation modes on the length of furrow with minimum unproductive expenditures are defined.