Артёмов М. П.¹Подригало М. А.²Шуляк М. Л.¹

¹ Харківський
національний технічний
університет сільського
господарства
ім. П. Василенка

² Харківський
національний
автомобільно дорожній
університет

Artiomov M. P.¹Podrigalo M. A.²Shuljak M. L.¹

¹ Kharkiv Petro Vasylenko
National Technical
University of Agriculture

² Kharkiv National
Automobile and Highway
University

УДК 629.01

ВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ АГРЕГАТІВ

В статті наведено аналіз діючих на машинно-тракторні агрегати (МТА) факторів, що формують силу опору в режимі сталого руху. Запропоновано оцінювати зміну опору руху на основі парціальних прискорень та наведена необхідна методика. Зазначені методи враховують виникнення поздовжніх лінійних прискорень, що викликають коливання швидкості агрегату, в залежності від зміни маси сільськогосподарської машини. Сталій рух МТА розглянутий, як послідовність розгнів та сповільнень, які виникають дискретно під впливом, як зовнішніх так і внутрішніх стохастичних факторів. Аналіз повного прискорення дозволяє стверджувати, що будь-які відхилення значень прискорення відносно його нульового значення при виконанні технологічної операції, викликає шкідливу роботу і втрату енергії. Незалежно від знаку проекції, діюча вздовж напрямку руху сила є умовою динамічної рівноваги, тому на даний момент уникнути коливань прискорення не можливо.

Ключові слова: динамічна система, опір руху агрегату, парціальні прискорення, швидкість руху.

Постановка проблеми. Виконання МТА технологічної операції пов'язане із постійними змінами діючих сил, як за величиною, так і за напрямком, які витрачаються як безпосередньо на виконання самої технологічної операції, так і на динамічні процеси, що виникають в системі взаємодії "трактор-знаряддя".

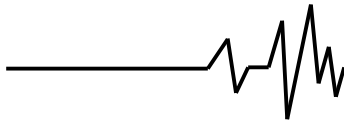
При сталому русі колісних машинно-тракторних агрегатів виникають додаткові втрати енергії, оскільки зазначений режим супроводжується появою поздовжніх лінійних прискорень, що викликають коливання лінійної швидкості машини щодо свого середнього значення, в залежності від зміни маси.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Ефективність функціонування машинно-тракторного агрегату визначається в основному забезпеченням стабільності його експлуатаційно-технологічних показників. В роботах [1, 2] відзначається, що рішення даної проблеми ускладнюється при нестабільних параметрах стану машинно-тракторного агрегату, обумовлених нестабільністю навантажувальних режимів, природно-

виробничих факторів, технологічного стану агрегатів та систем і т.д.

Для оцінки ефективності функціонування подібних технічних систем, зокрема рухомих об'єктів і технологічних процесів, ефективно використовується метод змінних стану, заснований на понятті стану [3, 4]. У даних роботах за стан системи у момент часу t_0 прийнятий такий мінімальний набір відомостей про поведінку системи, інформації якого разом з деякою вхідною функцією $U(t)$, заданої для інтервалу часу $t_0 \leq t \leq t_k$, достатньо для однозначного визначення єдиної вихідної функції $y(t)$ для $t_0 \leq t \leq t_k$, $t_k \geq t_0$.

Застосовуючи стандартну форму запису змінного стану трактора розглянемо загальний випадок руху машинно-тракторного агрегату, як автономної динамічної системи при зміні сили опору руху і кількості енергії, що використовується для руху. Цей вплив, як



правило, викликає зміну швидкості $v(t)$ поступального руху тракторного агрегату, що характеризується рівнянням [5]:

$$\frac{dv(t)}{dt} = \frac{P_{\kappa} - \sum R_c}{m_{az}}, \quad (1)$$

де P_{κ} – рухома сила агрегату (дотична сила тяги трактора); $\sum R_c$ – сума сил опору руху агрегату; m_{az} – приведена маса тракторного агрегату.

За умови, що приведена маса тракторного агрегату змінюється під час виконання технологічної операції рівняння (3.23) можна записати:

$$\frac{d(m_{az}V)}{dt} = P_{\kappa} - \sum R_c, \quad (2)$$

Сили опору руху тракторного агрегату в процесі роботи залежать від факторів, багато з яких є змінними, наприклад стан ґрунту і рельєф місцевості, фізико-механічні властивості оброблюваної ґрунту, глибина обробки, швидкісний режим і т.д. Відповідно до зміни сил опору змінюється і рухома сила агрегату, тобто dv/dt при виконанні тракторним агрегатом певного технологічного процесу безперервно змінюється як по величині, так і за знаком. Також слід зазначити. Найбільший вплив на опір руху агрегату надає швидкість його руху [1, 5]. Більшість відомих джерел при вивченні динамічних складових сталого руху не враховують додаткові стохастичні фактори, що виникають при змінній масі сільськогосподарської машини.

Мета дослідження є встановлення зв'язку між зміною маси сільськогосподарської машини та формування сили опору при сталому русі МТА. Вивчення цього впливу надасть можливість зменшити витрати енергії на виконання технологічної операції за рахунок своєчасного корегування необхідної потужності двигуна енергетичного засобу.

$$\frac{d(m_{az}V)}{dt} = P_{\kappa} + \frac{\partial P_{\kappa}}{\partial v} \Delta v + \Delta P_{\kappa i} - \sum R_{cy} + \frac{\partial \sum R_c}{\partial v} \Delta v + \Delta \sum R_c + \Delta \sum R_{cm}. \quad (5)$$

Зробимо перетворення:

$$\frac{d(m_{az}V)}{dt} = (P_{\kappa} - \sum R_{cy}) + \left(\frac{\partial P_{\kappa}}{\partial v} - \frac{\partial \sum R_c}{\partial v} \right) \Delta v + (\Delta P_{\kappa i} - \Delta \sum R_{ci}). \quad (6)$$

Введемо безрозмірні відхилення:

$$V = \frac{\Delta v}{v_n}; P_{\kappa i} = \frac{\Delta P_{\kappa i}}{P_{\kappa n}}; \sum R_{ci} = \frac{\Delta \sum R_{ci}}{\sum R_{cn}},$$

Основні результати дослідження. Враховуючи, що при виконанні багатьох сільськогосподарських операцій маса тракторного агрегату може збільшуватись або зменшуватись залежність (2) може бути лінеаризована, як монотонна безперервна функція. Тому розкладання опору руху агрегату може бути представлено рівністю [6]:

$$\sum R_c = \sum R_{cy} + \frac{\partial \sum R_c}{\partial v} \Delta v + \Delta \sum R_c + \Delta \sum R_{cm}, \quad (3)$$

де $\sum R_{cy}$ – стале значення опору; $\frac{\partial \sum R_c}{\partial v}$ –

значення похідної в точці сталого режиму руху; Δv – абсолютне відхилення швидкості агрегату;

$\Delta \sum R_c$ – відхилення сили опору, що залежить від агрофону місцевості; $\Delta \sum R_{cm}$ – зміна сили опору, що залежить від зміни маси агрегату $d(m_{az})/d(t)$.

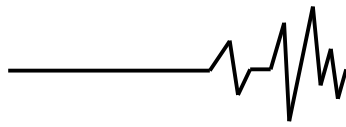
Рушійну силу агрегату з достатнім наближенням можна вважати безперервною і монотонною функцією швидкості, яка може бути розкладена у вигляді:

$$P_{\kappa} = P_{\kappa y} + \frac{\partial P_{\kappa}}{\partial v} \Delta v + \Delta P_{\kappa i}, \quad (4)$$

де $P_{\kappa y}$ – стале значення рушійної сили агрегату; $\frac{\partial P_{\kappa}}{\partial v}$ – значення похідної в точці

сталого режиму; $\Delta P_{\kappa i}$ – зміна рушійної сили внаслідок дії на неї регулюючого впливу (зміна кількості палива оператором, чи автоматичною системою);

Підставляючи значення $\sum R_c$ та P_{κ} в рівняння (2) і маючи на увазі, що $\sum R_{cy} = P_{\kappa y}$, отримаємо [6]:



де Δv , ΔP_{ki} , $\sum R_{ci}$, v_n , $P_{кн}$, $\sum R_{сн}$ – відповідно абсолютні відхилення і номінальні значення швидкості агрегату, рушійної сили і сил опору.

Отримаємо диференціальне рівняння поступального руху машинно-тракторного агрегату в безрозмірному вигляді [6]:

$$(T_v p + 1) \cdot V = K_v F K_m, \quad (7)$$

p – оператор, який замінює символ диференціювання (d/dt);

$$T_v = \frac{\partial m_{аз}}{\partial \sum R_{сm} + \frac{\partial \sum R_c}{\partial v} - \frac{\partial P_k}{\partial v}} - \text{постійна}$$

часу тракторного агрегату, с;

$$K_v = \frac{P_{кн}}{\frac{\partial \sum R_c}{\partial v} - \frac{\partial P_k}{\partial v}} - \text{коефіцієнт}$$

посилення тракторного агрегату по швидкості;

$$K_m = \frac{P_{кн}}{\frac{\partial \sum R_{сm}}{\partial t} - \frac{\partial P_k}{\partial v}} - \text{коефіцієнт}$$

посилення тракторного агрегату по масі;

$F = P_{ki} - \sum R_{ci}$ – регулюючий вплив на тракторний агрегат (зміна кількості і якості палива, що надходить у двигун внутрішнього згоряння, перемикання передач і т.д.).

$$\frac{d(m_{аз} V)}{dt} = (P_{кy} - \sum R_{cy}) + \left(\frac{\partial P_k}{\partial v} - \frac{\partial \sum R_c}{\partial v} \right) \Delta v + (\Delta P_{ki} - \Delta \sum R_{ci}). \quad (8)$$

Бачимо, що в рівнянні (6) $P_{кy}$, $\sum R_{cy}$ є постійні сили, що задаються початковими значеннями маси трактора та сільськогосподарської машини;

ΔP_{ki} , $\Delta \sum R_{ci}$ змінні частки сил, що виникають при змінному значенні маси сільськогосподарського агрегату. Сільськогосподарські машини, що мають змінну масу в більшості випадків складаються з двох основних компонентів робочих органів та ємності, або бункера. Під час виконання технологічної операції не змінюється маса трактора та конструктивної частини сільськогосподарської машини, змінною є тільки маса вантажу (насіння, добрива, продукція рослинництва та ін.). Масу агрегату можна представити:

$$\frac{dm_{аз}}{dt} = m_{mp} + m_{cx} + \frac{dm_{ен}}{dt}. \quad (9)$$

де m_{mp} – маса трактора; m_{cx} – маса сільськогосподарської машини; $m_{ен}$ – маса вантажу.

Розглянемо складову рівняння (8) за умови, що при сталому режимі руху

$$\frac{d(m_{аз} V)}{dt} = 0. \text{ Змінні частки сил } P_{ki}, \sum R_{ci},$$

є функцією ($\frac{dm_{ен}}{dt}$):

$$\frac{d(m_{аз} V)}{dt} = \Delta P_{ki} - \Delta \sum R_{ci}, \quad (10)$$

Найбільший вплив $m_{ен}$ справляє на зміну сумарної сили опору коченню, як рушіїв трактора, за рахунок довантаження, так і сільськогосподарської машини.

Сумарна сила опору кочення МТА:

$$P_f = R_{(P_f)mp} + R_{(P_f)cx}, \quad (11)$$

де $R_{(P_f)mp}$, $R_{(P_f)cx}$ – сили опору коченню рушіїв трактора та сільськогосподарської машини;

Необхідно враховувати, що зміна $m_{ен}$ відбувається за рахунок приєднання або від'єднання частинок вантажу в напрямку перпендикулярному напрямку руху машини.

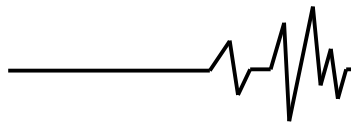
Проведемо перетворення рівняння (10) з урахуванням (11) отримаємо:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\Delta P_{ki}}{m_{аз}} - \frac{R_{(P_f)mp} + R_{(P_f)cx}}{m_{аз}} - \frac{V}{m_{аз}} \cdot \frac{dm_{аз}}{dt}, \quad (12)$$

Підставивши в (12) рівняння (9) та враховуючи, що:

$$\frac{dm_{аз}}{dt} = \frac{dm_{ен}}{dt} \text{ та } m_{ен} = \frac{dm_{ен}}{dt} \cdot t \quad (13)$$

отримаємо:



$$\frac{dV}{dt} = \frac{\Delta P_{ki}}{m_{mp} + m_{cx} + \frac{dm_{\text{вн}}}{dt} \cdot t} - \frac{R_{(P_f)mp} + R_{(P_f)cx}}{m_{mp} + m_{cx} + \frac{dm_{\text{вн}}}{dt} \cdot t} - \frac{V \cdot \frac{dm_{\text{вн}}}{dt}}{m_{mp} + m_{cx} + \frac{dm_{\text{вн}}}{dt} \cdot t}, \quad (14)$$

Парціальний прискорення, що створюється силою опору коченню:

$$\frac{dV_{P_f}^{\text{ПАР}}}{dt} = - \frac{R_{(P_f)mp} + R_{(P_f)cx}}{m_{mp} + m_{cx} + \frac{dm_{\text{вн}}}{dt} \cdot t} = -f \cdot g, \quad (15)$$

де: f – коефіцієнт опору коченню; g – прискорення вільного падіння.

Рівняння (14) матиме вид:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\Delta P_{ki}}{m_{mp} + m_{cx} + \frac{dm_{\text{вн}}}{dt} \cdot t} - f \cdot g - \frac{dm_{\text{вн}}}{dt} - \frac{V \cdot \frac{dm_{\text{вн}}}{dt}}{m_{mp} + m_{cx} + \frac{dm_{\text{вн}}}{dt} \cdot t} \quad (16)$$

Для сталого руху:

$$\Delta P_{ki} = f \cdot g \cdot (m_{mp} + m_{cx} + \frac{dm_{\text{вн}}}{dt} \cdot t) + V \cdot \frac{dm_{\text{вн}}}{dt}, \quad (17)$$

чи

$$\Delta P_{ki} = f \cdot g \cdot (m_{\text{TP}} + m_{cx}) + \frac{dm_{\text{вн}}}{dt} \cdot (f \cdot g \cdot t + V), \quad (18)$$

Рівняння (18) визначає закон зміни тягової сили на ведучих колесах трактора. Крутний момент на валу двигуна, відповідний

отриманню необхідної умови ΔP_{ki} на ведучих колесах трактора [7]:

$$M_e = \frac{\Delta P_{ki} \cdot r_{\partial}}{\eta_{\text{TP}}} = \frac{r_{\partial}}{\eta_{\text{TP}}} \left[f \cdot g \cdot (m_{\text{TP}} + m_{cx}) + \frac{dm_{\text{вн}}}{dt} \cdot (f \cdot g \cdot t + V) \right], \quad (19)$$

де r_{∂} – динамічний радіус ведучих коліс; η_{TP} – ККД трансмісії,

Визначити парціальне прискорення, що створюється силою опору коченню можливо за результатами експерименту [7]:

$$\frac{dV_{P_f}^{\text{ПАР}}}{dt} = -f' \cdot g \quad (20)$$

де: f' – приведений коефіцієнт опору кочення коліс, що враховує також втрати на тертя в трансмісії трактора.

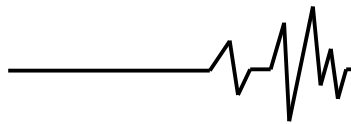
Тоді рівняння (18) з урахуванням (20) матиме вигляд:

$$\Delta P'_{ki} = \frac{dm_{\text{вн}}}{dt} \left(V - \frac{dV_{P_f}^{\text{ПАР}}}{dt} \cdot t \right) - \frac{dV_{P_f}^{\text{ПАР}}}{dt} (m_{\text{TP}} + m_{cx}), \quad (21)$$

Величини ΔP_{ki} і $\Delta P'_{ki}$ пов'язані між собою співвідношенням:

$$\Delta P'_{ki} = \frac{\Delta P_{ki}}{\eta_{\text{TP}}}, \quad (22)$$

Оскільки при визначенні парціального прискорення враховувалися втрати на тертя в трансмісії, отже, помноживши ліву і праву частини рівняння (21) на швидкість руху V отримаємо необхідний закон зміни ефективної потужності двигуна, що враховує змінну складову маси сільськогосподарського агрегату:



$$\Delta N_e = V \left[\frac{dm_{\text{вн}}}{dt} \left(V - \frac{dV_{P_f}^{\text{ПАР}}}{dt} \cdot t \right) - \frac{dV_{P_f}^{\text{ПАР}}}{dt} (m_{\text{ТР}} + m_{\text{СХ}}) \right], \quad (23)$$

Вираз (16) з урахуванням (20) прийме наступний вигляд:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\Delta P_{ki}}{m_{\text{ТР}} + m_{\text{СХ}} + \frac{dm_{\text{вн}}}{dt} \cdot t} + \frac{dV_{P_f}^{\text{ПАР}}}{dt} - \frac{dm_{\text{вн}}}{dt} \cdot \frac{V}{m_{\text{ТР}} + m_{\text{СХ}} + \frac{dm_{\text{вн}}}{dt} \cdot t}, \quad (24)$$

Враховуючи що:

$$\Delta P'_{ki} = \frac{\Delta N_e}{V}, \quad (25)$$

Перетворимо рівняння (24):

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\frac{\Delta N_e}{V} - V \frac{dm_{\text{вн}}}{dt}}{m_{\text{ТР}} + m_{\text{СХ}} + \frac{dm_{\text{вн}}}{dt} \cdot t} + \frac{dV_{P_f}^{\text{ПАР}}}{dt}. \quad (26)$$

Висновки. Більшість відомих джерел при вивченні динамічних складових сталого руху не враховують додаткові стохастичні фактори, що виникають при змінній масі сільськогосподарської машини. Встановлення зв'язку між зміною маси машин та формуванні сили опору при сталому русі МТА надає можливість зменшити витрати енергії на виконання технологічної операції. Таке зниження можливо реалізувати використанням автоматичних систем, що своєчасно корегують необхідну потужність та адаптують режим роботи двигуна енергетичного засобу в залежності від дійсного значення маси вантажу.

Список використаних джерел

1. Агеев Л.Е. Основы расчета оптимальных и допускаемых режимов работы машинно-тракторных агрегатов / Л.Е. Агеев – Л.: Колос, 1978. – 290 с.
2. Самсонов В.А. Расчет показателей трактора с учетом влияния природно-производственных факторов / В.А. Самсонов // Трактора и сельскохозяйственные машины. – 2007. – № 4. – С. 21-25.
3. Деруесо П. Пространство состояний в теории управления / П. Деруесо, Р. Рой, Ч. Клouz. – М.: Наука, 1970. – 620 с.
4. Александров Е.Е. Автоматичне керування рухомими об'єктами і технологічними процесами: Підручник у 3-х томах. Т.1. Теорія автоматичного керування / Е.Е. Александров, Е.П. Козлов, Б.І. Кузнецов; за ред. Е.Е. Александрова. – Харків: НТУ «ХПІ», 2002. – 490 с.

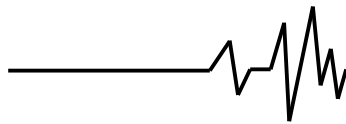
5. Лебедев А.Т. Нестабильность динамических параметров поступального руху тракторного агрегату / А.Т. Лебедев, М.Л. Шуляк, О.В. Кот // Механізація сільськогосподарського виробництва. Вісник ХНТУСГ: – Х.: ХНТУСГ, 2012. Вип. 124 – С. 49–54.

6. Шуляк М.Л. Зависимость силы сопротивления движению тракторного агрегата от переменной массы сельскохозяйственной машины. / М.Л. Шуляк, Н.П. Артемов // Agricultural machinery.Varna., 2015. Issue 4, С. 10 – 13.

7. Подригало М.А. Повышение эффективности работы сельскохозяйственного уборочного комплекса на основе синхронизации движения агрегатов / М.А. Подригало, А.Т. Лебедев, В.С. Кисель // Механізація сільськогосподарського виробництва. Вісник ХНТУСГ: – Х.: ХНТУСГ, 2011. Вип. 107 – С. 43 – 53.

Список джерел в транслітерації

1. Aheev L.E. Основы расчета оптимальных и допускаемых режимов работы машинно-тракторных агрегатов / L.E. Aheev – L.: Kolos, 1978. – 290 s.
2. Samsonov V.A. Raschet pokazatelei traktora s uchetom vliyaniya prirodno-proizvodstvennykh faktorov / V.A. Samsonov // Traktora y selskokhoziaistvennye mashyny. – 2007. – № 4. – S. 21-25.
3. Derueso P. Prostranstvo sostoianyi v teoryu upravleniya / P. Derueso, R. Roi, Ch. Klouz. – M.: Nauka, 1970. – 620 s.
4. Aleksandrov Ie.Ie. Avtomatychne keruvannia rukhomymy ob'iektamy i tekhnolohichnymy protsesamy: Pidruchnyk u 3-kh tomakh. T.1. Teoriia avtomatychnoho keruvannia / Ie.Ie. Aleksandrov, E.P. Kozlov, B.I. Kuznietsov; za red. Ie.Ie. Aleksandrova. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2002. – 490 s.
5. Lebediev A.T. Nestabilnist dynamichnykh parametrov postupalnoho rukhu traktornoho ahrehatu / A.T. Lebediev, M.L. Shuliak, O.V. Kot // Mekhanizatsiia silskohospodarskoho vyrobnytstva. Visnyk



KhNTUSH: – Kh.: KhNTUSH, 2012. Vyp. 124 – S. 49 – 54.

6. Shuliak M.L. Zavysymost syly soprotyvleniya dvyzheniyu traktornoho ahrehata ot peremennoi massy selskokhoziaistvennoi mashyny. / M.L. Shuliak, N.P. Artemov // Agricultural machinery.Varna., 2015. Issue 4, S. 10 – 13.

7. Podryhalo M.A. Povyshenye effektivnosti raboty selskokho- ziaistvennogo uborochnoho kompleksa na osnove synkronyzatsyy dvyzheniya ahrehatov / M.A. Podryhalo, A.T. Lebediev, V.S. Kysel // Mekhanizatsiia silskohospodarskoho vyrobnytstva. Visnyk KhNTUSH: – Kh.: KhNTUSH, 2011. Vyp. 107 – S. 43 – 53.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ АГРЕГАТОВ

Аннотация. В статье приведен анализ действующих на машинно-тракторные агрегаты (МТА) факторов, которые формируют силу сопротивления в режиме постоянного движения. Предложено оценивать изменение сопротивления движения на основе парциальных ускорений и приведена необходимая методика. Отмеченные методы учитывают возникновение продольных линейных ускорений, которые вызывают колебание скорости агрегата, в зависимости от изменения массы сельскохозяйственной машины. Постоянная скорость движения МТА рассмотрена, как последовательность разгонов и замедлений, которые возникают дискретно под влиянием, как внешних, так и внутренних стохастических факторов. Анализ полного ускорения позволяет утверждать, что любые отклонения значений ускорения относительно его нулевого значения при выполнении технологической операции, вызывает вредную работу и потерю энергии. Независимо от знака проекции, действующая вдоль направления движения сила является

условием динамического равновесия, потому на данный момент избежать колебаний ускорения невозможно.

Ключевые слова: динамическая система, сопротивление движения агрегата, парциальные ускорения, скорость движения.

DETERMINATION OF DYNAMIC CHARACTERISTICS OF THE AGRICULTURAL MACHINERY

Annotation. The wheeled tractor units have additional energy loss in constant movement. Such regime is accompanied by longitudinal linear acceleration, causing fluctuations of the machine linear speed and relative to its mean value, depending on the mass change.

The efficiency of the machine-tractor unit is determined primarily by ensuring the stability of its operational and technological parameters. The drag forces of the tractor unit during its work depends on factors, many of which are variable, for example: soil conditions, topography, physical and mechanical properties of the treated soil, working depth, speed mode.

Studying of the relationship between changes in the mass of agricultural machines and the formation of the drag force at a constant movement of the machine and tractor units will reduce energy costs for technical operations due to timely adjustments of the necessary power means the engine power.

The driving force of the machine with a sufficient approximation can be considered a continuous and monotonic function of speed.

Determination of the connection between the change in the mass of machines and the formation of the drag force at a constant speed of the machine-tractor unit can reduce energy costs for technical operations. Such a reduction can be implemented by using automated systems that timely corrective power required and adapt the power means the engine operation, depending on the actual value of the mass of the cargo.

Key words: dynamical system, the resistance movement of the unit, the partial acceleration, speed.