

УДК 629.1.07

М.Л. Шуляк¹, А.Т. Лебедев¹, М.П. Артёмов¹, В.П. Мальцев²¹ Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка, Харків² Інститут радіофізики і електроніки імені О.Я. Усикова НАН України, Харків

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ АЛГОРИТМУ КЕРУВАННЯ РЕЖИМАМИ РОБОТИ ТРАНСПОРТНОГО АГРЕГАТУ

В роботі обґрунтовано режим постійної швидкості, як найкращий з позиції енергозбереження, запропоновано алгоритм керування режимами роботи агрегату та інформаційний комплекс для його реалізації. Проведеними експериментальними дослідженнями встановлено, що функціонування агрегату в режимі, котрий найбільш наближений до постійної швидкості, є найкращим з позиції паливної економичності. Також підтверджено вплив зміни маси вантажу на функціональні параметри транспортного агрегату.

Ключевые слова: транспортний агрегат, динаміка агрегата, центр мас, прискорення.

Вступ

Збільшення використання на транспортних роботах енергонасичених тракторів призвело до суттєвого збільшення маси вантажу, що транспортується. Проте основна проблема транспортних операцій, які на даний момент становлять 35 % від річної зайнятості трактора, залишається невирішеною, і зумовлена суттєвим недовантаженням двигуна. В той же час зміна маси вантажу під час виконання транспортно-технологічної операції додатково дестабілізує роботу транспортного агрегату (ТА), що потребує детального експериментального дослідження.

Аналіз джерел інформації. В роботі [1] обґрунтована концепція енергозбереження трактору, на основі аналізу корисної роботи сил, прикладених до агрегату. В роботі [2] запропонована методика оцінки додаткових витрат енергії в режимі усталеного руху ТА, що викликані коливаннями сумарних тягової сили та сил опору. В роботі [3] отримано експериментальне підтвердження можливості вибору режиму роботи на основі динамічних функціональних параметрів, які були основою для алгоритму керування [4].

Мета і постановка задачі. Метою роботи є обґрунтування вибору режимів роботи ТА з вантажем змінної маси та розробка діагностичного комплексу для дослідження функціональних параметрів роботи агрегату.

Основна частина

Виконання трактором транспортних робіт пов'язане з великими витратами енергії, яка витрачається як безпосередньо на виконання самої транспортної операції, так і на динамічні процеси, що виникають в системі «трактор-знаряддя». В даному випадку рівняння руху транспортного агрегату можна записати у такому вигляді [5]:

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

де m_m – маса транспортного агрегату (трактор – робоче знаряддя), кг;

v – швидкість руху, м/с;

R_c – сила опору руху, Н;

η_m – тяговий ККД трактора;

N_e – номінальна потужність двигуна, кВт.

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

З достатнім ступенем точності можна прийняти для певної швидкості руху транспортного агрегату, а R_c залежна, з одного боку, від транспортного процесу, дорожнього середовища і т.д.; з іншого боку, вона квадратично залежить, наприклад внаслідок аеродинамічного опору, від швидкості руху, тобто:

$$R_c = R_c(\ell) + kv + k_1 v^2, \quad (2)$$

де ℓ – поточне значення шляху, пройденого транспортним агрегатом від початку руху ($d\ell/dt = v$);

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

k, k_1 – постійні коефіцієнти.

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

$$\ell'' \ell' + r_c(\ell) \ell' + k \ell^2 + k_1 \ell^3 = \eta_m p, \quad (3)$$

де ℓ'', ℓ' – швидкості і прискорення агрегату на певній ділянці дороги;

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 транспортним агрегатом ділянки дороги ℓ за час T витрата палива двигуном трактора дорівнює інтегралу:

$$G = \int_0^m q dt = \frac{1}{\eta} \int_0^m (\ell'' \ell' + r_c(\ell) \ell' + k_1 \ell'^2 + k_2 \ell'^3) dt + \int_0^m a dt. \quad (5)$$

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

$$I = \int_0^m [\ell'' \ell' + r_c(\ell) \ell' + k_1 \ell'^2 + k_2 \ell'^3] dt \quad (6)$$

Функція $\ell(t)$ повинна задовольняти таким обмеженням:

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

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

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

Подібні завдання вирішуються варіаційними методами [5], відповідно до яких рівняння екстремалей визначаються з рівняння Ейлера-Пуассона для функціонала (6):

$$\ell''(2k + 6k_1 \ell') = 0. \quad (7)$$

Дане рівняння розпадається на два рівняння $\ell'' = 0$ і $2k + 6k_1 \ell' = 0$, рішеннями яких є $v = \text{const}$.

Отже, найменша витрата палива досягається при русі транспортного агрегату 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, або двигунів постійної потужності, для яких характерний високий коефіцієнт запасу крутного моменту (відношення максимального моменту двигуна до номінального).

Також забезпечити режим постійної швидкості можливо з застосуванням алгоритму керування ре-

жимами роботи транспортного агрегату, що базується на аналізі області функціонування, що апроксимована еліпсоїдом [4, 6]. Реалізація представленого алгоритму полягає в виборі режимів роботи з найменшими коливаннями прискорення при усталеному русі агрегату та найбільшій питомій вазі ядра еліпсоїда (рис. 1).

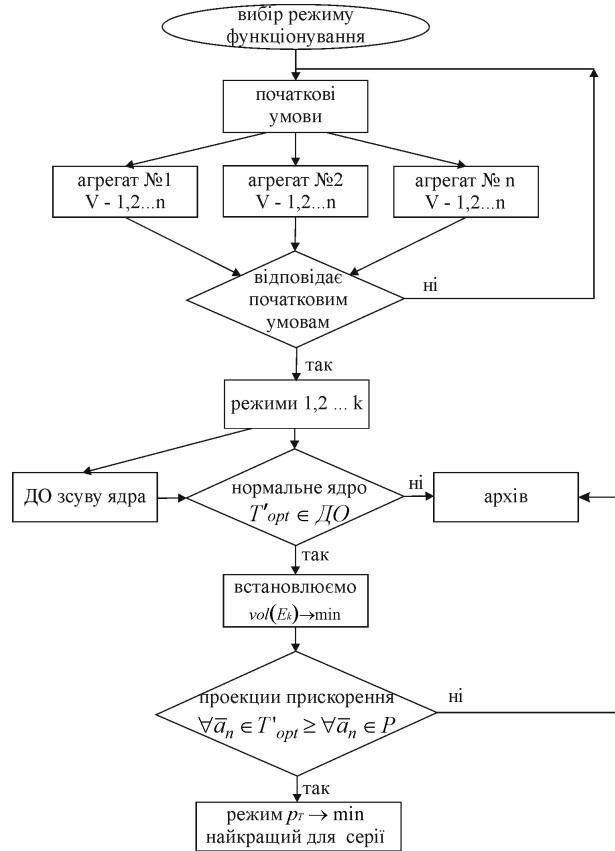


Рис. 1. Алгоритм вибору режиму роботи, в основу якого покладений аналіз області функціонування трактора

Запропонований алгоритм дозволить суттєво прискорити аналіз експериментальних даних та вибрати режим найбільш близький до оптимального, враховуючи як елементи класичної тягової методики, так і динамічні характеристики ТА. Врахування додаткових втрат енергії та напрямки їх зниження відкривають нові перспективи для підвищення ефективності використання ТА при виконанні транспортних операцій.

Реалізація алгоритму потребує розробки вимірювально-керуючого комплексу.

Для досягнення поставленої мети потрібно виконати наступні задачі:

- елементи комплексу повинні надавати вичерпну інформацію для дослідження узагальнених параметрів функціональної стабільності;

- вимірювально-керуючий комплекс повинен надавати достовірну інформацію для подальшого аналізу, для чого потрібно застосовувати дублюючі системи;

- кількість елементів комплексу повинна бути обґрунтована та прагнути до необхідного мінімуму;
- програмне забезпечення для моніторингу, фільтрації та аналізу експериментальних даних повинно витратити мінімум ресурсів (необхідна складова для застосування комплексу з системами малої обчислювальної потужності);
- встановлення та калібрування вимірювальних елементів комплексу повинно займати не більше 30 хв.;
- при виборі складу вимірювального обладнання необхідно застосовувати обладнання, використання якого для наукових цілей не викликає сумнівів в світовому досвіді;
- синхронізація потоку дослідних даних отриманих з різних елементів комплексу.

Запропонований комплекс повинен забезпечувати виконання алгоритму керування за рахунок використання високочутливих датчиків та відповідного ПО. Одна з найбільш важких проблем яку необхідно вирішити це синтез вимірювальних датчиків, робота яких спирається на застосування принципово різних фізичних ефектів (індукція, електромагнітні коливання, радіохвилі). Для кожного з таких датчиків властиві свої спектри шумів, тому при роботі ПО потрібно використовувати алгоритми фільтрації здатні усунути цей недолік.

Світовий досвід доводить, що одним з найкращих варіантів вирішення цієї проблеми є застосування дублюючих систем моніторингу. При виборі систем дублювання необхідно пам'ятати, що застосування великої кількості вимірювального обладнання призведе до ускладнення проведення дослідів та знизить їх ефективність, тому необхідно застосовувати необхідний мінімум приладів. При обранні яких потрібно керуватися правилом – для визначення узагальнених параметри функціональної стабільності (прискорення, швидкість, буксування) застосовується не менше двох дублюючих систем. Наприклад для визначення прискорення окрім акселерометра застосувати радар чи лідар.

Застосування такого принципу комплектування вимірювально-керуючого комплексу дозволить, за умови відповідного фільтрування отриманих даних, коригувати режими роботи ТА спираючись на алгоритм керування.

Поставлена задача вирішується за рахунок того, що діагностичний комплекс моніторингу динамічних параметрів тягово-транспортних засобів включає вимірюючі датчики, систему збору та синхронізації даних, програмне забезпечення для фільтрації та аналізу експериментальних досліджень, який відрізняється тим, що вимірювання дійсної швидкості руху відбувається з застосуванням когерентного радара виконаного на гомодинній схемі, в конструкції якого передбачена можливість зміни

кута нахилу передаючої антени, а для вимірювання обертів рушя використовується датчик на основі ефекту Холла, що просто монтується на будь-який тип ТА за рахунок уніфікованої системи кріплення на неодимових магнітах, додатково до фільтрів вмонтованих в самі датчики додається система фільтрації, що програмується на відповідну чутливість, за вимогами споживача та розширене програмне забезпечення, що дозволяє порівнювати обрані режими функціонування за критерієм енергозбереження в режимі реального часу.

Вирішення завдання відбувається наступним чином запропонований комплекс (рис. 2) складається з чотирьох основних частин: радар, датчик на основі Холла, інерційний датчик прискорення та програмно аналітична складова.

Встановлення дійсної швидкості руху відбувається радаром визначеного діапазону. Відповідні частоти випромінюються за рахунок використання генератора на ЛПД 4 та феритового циркулятору 2 (ФЦ), а відбитий від опірної поверхні сигнал приймається антеною 1 (А), далі з використанням змішувача 3 (ЗМ) підсилюється доплеровські частоти 5 (ПДЧ), оброблений сигнал потрапляє в реєстраційний пристрій швидкості 7 (РПШ). Радар має автономне джерело живлення 6 (АДЖ) достатнє за ємністю для проведення довготривалих експериментів.

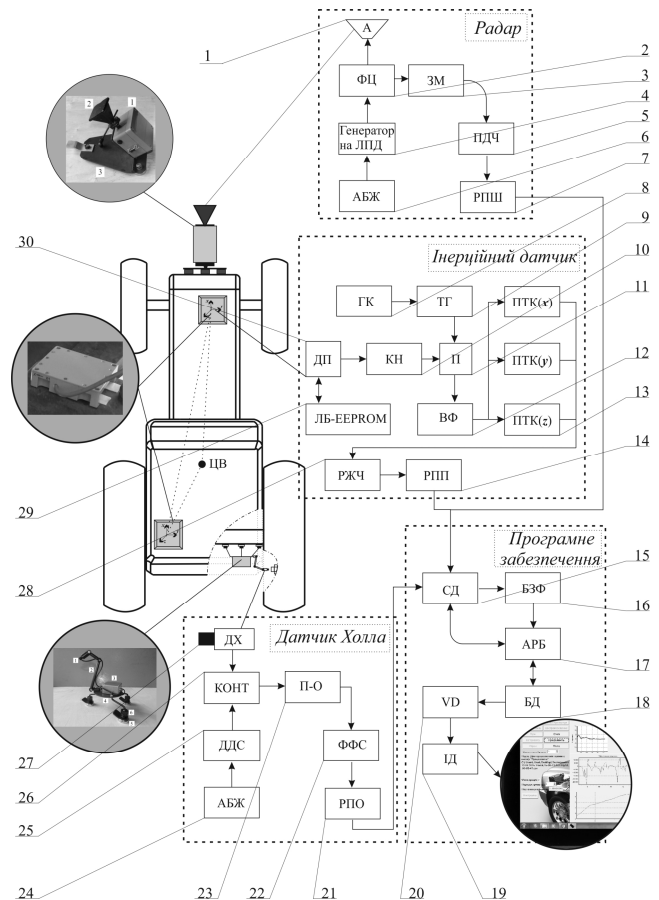


Рис. 2. Діагностичний комплекс моніторингу динамічних параметрів тягово-транспортних засобів

Для дослідження силових динамічних параметрів використовується інерційні датчики прискорення 30 (ДП), які розташовуються в довільних точках рами елементів ТА за умовою, що на кожний елемент встановлюється мінімум два датчика. Отримані данні конвертуються 10 (КН) та підсилюються 11 (П) з допомогою генератора частоти 8 (ГЧ) та тактового генератора 9 (ТГ). Далі підсилений сигнал потрапляє до вмонтованого в плату фільтру низьких частот 12 (ВФ) та корегується за допомогою пристрою температурної компенсації 13 (ПТК) для кожної з основних координатних осей. Датчик має можливість вибору режиму чутливості 28 (РЖЧ) та реєстраційний пристрій 14 (РПП). Передбачена система соматестування та корекції положення датчика 29 (ЛБ-EEPROM).

Оберти колеса визначаються за допомогою датчика Холла 27 (ДХ) живлення до якого підводиться від автономного джерела 24 (АДЖ) за допомогою двохполярного джерела струму 25 (ДДС). Керує роботою датчика контролер 26 (КОНТ), отриманий сигнал потрапляє в приймач-обмежувач 23 (П-О) після чого фільтрується від наявних флуктуаційних помилок 22 ФФС та реєструється в реєстраційному пристрої 21 (РПО) обертів колеса.

Подальшу обробку та синхронізацію експериментальних даних робить спеціальне програмне забезпечення. Дослідні данні, що надходять з реєстраційних пристроїв, синхронізуються за постійною часу та перевіряються на відповідність 15 (СД). Далі в блоці зовнішньої фільтрації 16 (БЗФ), де передбачені комплекти фільтрів для кожного з отриманих сигналів, виділяються необхідні для подальшого вивчення амплітудно-частотні спектри. Оброблені сигнали потрапляють до аналітично-розрахункового блоку 17 (АРБ) де математичний апарат проводить статистичну та спектральну оцінку та виявляє невідповідності сигналів, за наявності таких АРБ повторно звертається до СД і проводить фільтрацію з іншими налаштуваннями. Проаналізований дослід зберігається в банку даних 18 (БД) на жорсткому диску. Візуальне представлення параметрів, що фіксує діагностичний комплекс відбувається за допомогою програми «Vehicle dynamics v. 3.9.2» 20 (VD) на інформаційному дисплеї 19 (Д) ноутбука, чи планшета. Програмне забезпечення комплексу має можливість проводити аналіз отриманих даних, як безпосередньо під час проведення дослідження – в режимі реального часу, так і відтворювати експеримент в лабораторних умовах на основі даних з реєстраційних пристроїв.

Таким чином, запропонований діагностичний комплекс моніторингу динамічних параметрів тягово-транспортних засобів дозволяє з високою точністю досліджувати, в режимі реального часу, зміни параметрів роботи ТА та обирати оптимальні режими функціонування.

Експериментальні дослідження проводилися на агрегаті Challenger MT685D + причеп накопичувач ПБН – 30 при виконанні транспортування-перевантаження насіння соняшника, рис. 3.



Рис. 3. Транспортно-технологічний агрегат Challenger MT685D + ПБН – 30 (транспортування насіння соняшника)

Маса Challenger MT685D дорівнює 10300 кг, максимальна вага насіння соняшника при повному завантаженні по об'єму причепа дорівнює 11000 кг.

Дослідження проводилися при зміні маси вантажу в причепі, режими роботи корегувалися відповідно до зміни сумарної сили опору.

Дослідимо функціональну залежність зміни питомої ваги ядра еліпсоїда від маси вантажу причепа ПБН – 30 $p_{Ti} = f(m_{вн})$ (рис. 4).

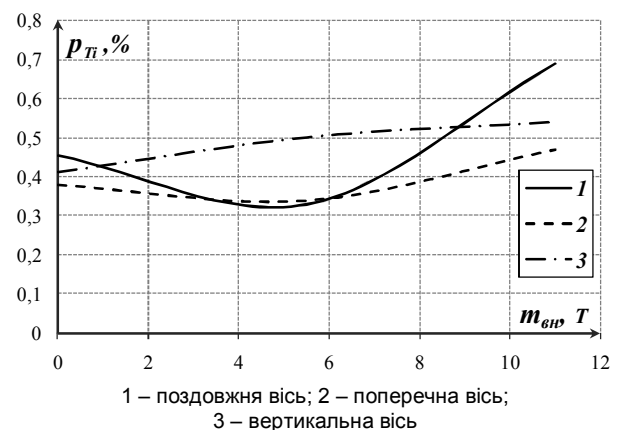


Рис. 4. Функціональна залежність питомої ваги ядра еліпсоїда та маси вантажу

Аналіз представленої графічної залежності дозволяє встановити дві цікаві закономірності зі збільшенням маси:

для вертикальної вісі майже за лінійною залежністю збільшуються і вага ядра, це просто пояснюється збільшення інерціальності системи, що зменшує розмах коливань прискорення і компоненти концентруються навколо математичного очікування; для поперечної та поздовжньої вісі характерне зниження ваги ядра при неповному завантаженні причепа, а найкращі показники досягаються при максимальній масі.

Вибір режиму роботи ТА спирається на потенційні можливості трактора та технологічні вимоги. Швидкість руху Challenger MT685D + ПБН – 30 за умов даного агрофону повинна становити 15 км/год. Таку швидкість можливо реалізувати на двох передачах трансмісії: «rabbit 17» та «rabbit 19». Годинна витрата палива для «rabbit 17» становить $G_{\text{год}} = 31,47$ л/год, а питома $g_e = 0,274$ кг/кВт на обертах $n_e = 1950$ хв⁻¹ реалізується необхідна швидкість руху. Для «rabbit 19» необхідно знизити частоту обертання колінчастого валу двигуна з $n_{e1} = 2150$ хв⁻¹ до $n_{e2} = 1750$ хв⁻¹, це дозволить більш повно завантажити двигун та покращити паливну економічність – $g_e = 0,268$ кг/кВт. Година витрата палива зменшиться $G_{\text{год}} = 30,83$ л/год на 0,907 л/год.

Проте слід зауважити, що вибрати раціональний режим для цього агрегату досить складно бо при його агрегуванні не було враховано відповідність гакового зусилля, тяговому опору причепа. При необхідному $P_{\text{так}} = 17,5-19$ кН, на передачах трансмісії, що дозволяють реалізувати потрібну швидкість, номінальне завантаження вдвічі більше: «rabbit 17» $P_{\text{так17}} = 44,5$ кН; «rabbit 19» $P_{\text{так19}} = 40,94$ кН. Тому для транспортування перевантаження насіння соняшника доцільно використовувати трактор з менш потужним двигуном або агрегувати трактор Challenger MT685D з причепом ПБН – 40.

Висновки

Запропонований алгоритм керування режимами роботи та діагностичний комплекс моніторингу динамічних параметрів тягово-транспортних засо-

бів, дозволяє зменшувати коливання прискорення агрегату тобто спрямовувати його функціонування в оптимальну область за критерієм енергозбереження. Експериментальні дослідження підтвердили, що функціонування агрегату в режимі, що найбільш наближений до постійної швидкості є найкращим з позиції паливної економічності. Також підтверджено вплив зміни маси вантажу на функціональні параметри транспортного агрегату.

Список літератури

1. Шуляк М.Л. Оцінка функціонування сільськогосподарського агрегату за динамічними критеріями / М.Л. Шуляк, А.Т. Лебедев, М.П. Артьомов, С.І. Калінін // *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів* – 2016. – № 4. – С. 218 – 226.
2. Подригало М.А. Оценка дополнительных энергетических потерь при установившемся режиме движения транспортно тяговых машин / М.А. Подригало, Н.П. Артемов, Д.В. Абрамов, М.Л. Шуляк // *Механіка та машинобудування «ХП»*. – Харків: ХП, 2015. – Вип. № 9. – С. 98 – 107.
3. Шуляк М.Л. Вибір оптимального режиму функціонування агрегату на основі динамічних параметрів / М.Л. Шуляк // *Інженерія природо користування* – 2015. – № 2 (4). – С. 85 – 91.
4. Шуляк М.Л. Вибір раціонального режиму роботи МТА на основі аналізу еліпсоїда функціонування / М.Л. Шуляк // *Інженерія природо користування* – 2016. – № 2 (6). – С. 99 – 104.
5. Гельфанд Н.М., Фомин С.В. Вариационные исчисление. – М.: Физматгиз, 1961. – 238 с.
6. Шуляк М.Л. Область функціонування машино-тракторного агрегату, що апроксимована поверхнею другого порядку / М.Л. Шуляк // *Технічні науки: зб. наук. праць ВНАУ*. – Вінниця: ВНАУ, 2016. – Вип. 1(93), т. 1. – С. 28 – 31.

Надійшла до редколегії 31.03.2017

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Б.Т. Кононов, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ РАБОТЫ ТРАНСПОРТНОГО АГРЕГАТА

М.Л. Шуляк, А.Т. Лебедев, Н.П. Артемов, В.П. Мальцев

В работе обоснован режим постоянной скорости, как лучший с точки зрения энергосбережения, предложен алгоритм управления режимами работы агрегата и информационный комплекс для его реализации. Проведенными экспериментальными исследованиями установлено, что функционирование агрегата в режиме, который больше всего приближен к постоянной скорости, является лучшим с точки зрения топливной экономичности. Также подтверждено влияние изменения массы груза на функциональные параметры транспортного агрегата.

Ключевые слова: транспортный агрегат, динамика агрегата, центр масс, ускорение.

EXPERIMENTAL STUDY OF THE ALGORITHM FOR CONTROLLING THE OPERATING MODES OF THE TRANSPORT UNIT

M.L. Shulyak, A.T. Lebedev, N.P. Artyomov, V.P. Maltsev

In the work the operating modes at the constant speed is justified, as the best from the point of view of energy saving. An algorithm for controlling the operation modes of the transport units and the information complex for its implementation are proposed. Experimental studies have shown that the operation of the transport units in the mode most closely approximated to a constant speed is the best of the fuel efficiency. The effect of changing the mass of the load on the functional parameters of the transport unit has also been confirmed.

Keywords: transport unit, unit dynamics, center of mass, acceleration.