

**ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ТА ДОВГОВІЧНОСТІ  
ТРАКТОРНИХ ДВИГУНІВ ШЛЯХОМ СТАБІЛІЗАЦІЇ  
ПОТУЖНОСТІ, ЯКА СПОЖИВАЄТЬСЯ**

**В.М. Третяк, к.т.н.<sup>1)</sup>; Р.В. Оляднічук, викладач<sup>2)</sup>;  
С.П. Погорілий, к.т.н.<sup>3)</sup>; М.В. Третяк, м.н.с.<sup>4)</sup>**

<sup>1)</sup>лабораторія мобільної енергетики та альтернативних видів енергії,  
Національний науковий центр «Інститут механізації та електрифікації  
сільського господарства»

<sup>2)</sup>Уманський національний університет садівництва

<sup>3)</sup>Національна академія аграрних наук України

<sup>4)</sup>лабораторія електромобілів Інститут електродинаміки Національної  
академії наук України

*Розглянуто спосіб підвищення надійності та довговічності тракторних двигунів шляхом стабілізації впливу змінного навантаження на режими роботи двигуна.*

**Вступ.** В Україні не виробляють двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ) для мобільних енергетичних засобів сільськогосподарського призначення. Тому при розробці та експлуатації машинно-тракторних агрегатів (МТА) необхідно раціонально використовувати властивості існуючих на ринку двигунів. Режим роботи двигуна суттєво впливає як на його економічність так і на показники надійності, безвідмовності та довговічності.

Вартість сучасних двигунів, як високотехнологічних агрегатів, досить висока та більшість прибутків виробники ДВЗ одержують за рахунок продажу комплектуючих та запасних частин до них. У зв'язку з цим провідні світові виробники мобільної техніки суттєву увагу приділяють удосконаленню методів і конструкцій, які дозволяють оптимізувати роботу ДВЗ в необхідних діапазонах режимів експлуатації. Це відноситься до використання безступінчастих гідромеханічних трансмісій різних конструкцій в тракторах [1] (наприклад Fendt «Vario»), гібридних електромеханічних трансмісій з накопичувачами електричної енергії в автомобілях, механічних накопичувачів енергії в різних галузях міського транспорту та інші приклади в дорожньо-будівельній техніці (рис. 1). Активно впроваджують гібридні силові установки фірми Toyota Industries, Volvo Technology та Volvo Powertrain.

Крім того, накопичувачі енергії активно використовують в системах електропостачання. Це стосується не тільки гідроакумулюючих станцій (Київська, Ташолицька, Дністровська, Канівська), а і нових розробок на підставі супермаховиків (200 супермаховиків м. Стівентон, США).

Відомо, що ДВЗ, які використовують в стаціонарних умовах з стабільною частотою обертання мають більший термін наробітку на відмову та довговічність. Стабілізація режимів роботи ДВЗ дозволяє суттєво підвищити їх показники економічності, надійності та безвідмовності.



Рис.1. Дорожньо-будівельна техніка фірм Komatsu та Kawasaki, яку обладнано накопичувачами енергії

**Аналіз публікації.** З загальної теорії міцності та надійності відомо, що підвищені динамічні навантаження, які виникають при перехідних процесах, суттєво знижують довговічність елементів конструкції. Так наприклад [2], інтенсивність зносу двигунів, які стоять на автобусах ЛАЗ-695Ж (з гідromeхaнічною трансмісією) у 2,4 нижче чим у автобусів ЛАЗ-695Е (з механічною коробкою передач), які робили в однакових умовах та однаковим пробігом. Аналогічні результати одержано і при порівнянні інтенсивності зносу судових двигунів. Найбільшу інтенсивність зносу було виявлено у портових буксирів, що обумовлено найбільшою частотою зміни режимів роботи.

Останнім часом роботи з впровадження накопичувачів енергії проводяться майже в усіх галузях транспорту. При використанні накопичувачів енергії на тепловозах [3] знижується кількість накопичування пошкоджень в деталях циліндро-поршневої групи завдяки зниженню термічного перевантаження на несталіх режимах роботи дизеля.

Ефективність роботи дизеля в складі машинно-тракторних агрегатів (МТА) залежить від різних експлуатаційних факторів [4], з яких найбільший вплив має невстановлений режим роботи агрегату, який характеризується коефіцієнтом варіації крутного моменту двигуна. Якщо за одиницю прийняти номінальне навантаження двигуна за крутним моментом, то середнє експлуатаційне навантаження змінюється від 0,95 до 0,60 а коефіцієнт варіації – від 5 до 40 %.

Коливальний характер навантаження при виконанні машинно-тракторним агрегатом технологічних операцій обумовлює втрати потужності дизеля з причини розбіжності моменту двигуна і моменту опору, що викликає підвищення інтенсивності спрацювання деталей ЦПГ та зниження надійності двигуна в цілому.

До причин, які пояснюють збільшення інтенсивності спрацювання на невстановленому режимі навантаження відносять: інтенсифікацію контактного зношування за рахунок додаткових інерційних навантажень; порушення нормального проходження процесу горіння; зростання динамічних показників циклу; погіршення умов мащення та очистки при значному коливанні швидкісного режиму двигуна.

Неперервні коливання режимів навантаження та частоти обертання колінчатого вала дизеля при експлуатації трактора призводить до зміни форми перехідних процесів в системі автоматичного регулювання, при цьому зміна циклової подачі палива і повітря проходить з різним ступенем інтенсивності, що викликає порушення узгодженості роботи цих систем, погіршуючи процес горіння та умови мащення механізмів і деталей двигуна.

Складність обліку впливу різних факторів в умовах експлуатації на роботу системи живлення визначає комплексний підхід до вирішення даної проблеми. Створення основ функціонування системи «двигун-трактор-агрегат» та розробка методів оптимального керування параметрами та режимами роботи дизеля в складі ґрунтообробного МТА є актуальною задачею.

**Мета дослідження.** Покращення техніко-експлуатаційних показників роботи МТА шляхом оптимізації режимів роботи системи «ДВЗ – трансмісія – акумулятор енергії» завдяки зменшенню динамічних навантажень при суттєвих змінах потужності, яка споживається.

**Робоча гіпотеза.** Підвищення надійності та довговічності двигунів сільськогосподарських МТА при роботі зі змінним навантаженням можна забезпечити шляхом стабілізації його режимів роботи впровадженням в трансмісію акумуляторів енергії.

**Характеристики пристроїв накопичування енергії.** За даними Ristinen, R. A., and Kraushaar, J. J. (1999). Energy and the Environment, John Wiley & Sons, New York наведено таблицю 1, в якій є порівняльні характеристики акумуляторів енергії.

Таблиця 1. Щільність енергії без врахування ваги мотора, генератора, балонів

Пристрій, матеріал	Щільність енергії, кВт×год/кг без врахування ККД та маси двигуна	ККД, %	Щільність енергії, кВт×год/кг з урахуванням ККД
Водень	38,0	50÷60	20,0÷23,0
Бензин	13,0÷14,0	25÷30	3,25÷4,2
Свинцево-кислотний акумулятор	0,025÷0,04	96÷98	0,02÷0,039
Гідравлічна ємність	0,0003	64	0,0002
Сталевий маховик	0,05	96÷98	0,049
Маховик з вуглецевого волокна	0,125÷0,5	96÷98	0,12÷0,49
Маховик з кварцового скла	0,9	96÷98	0,88
Кільцевий маховик	1,4÷4,17	96÷98	1,36÷4,0
Стиснуте повітря	2 (на 1 м <sup>3</sup> )	30÷40	0,6÷0,8

В таблиці 2 наведено крім того термін роботоздатності акумуляторів.

Аналіз наведених даних показує, що як енергоносіє бажано використовувати водень, але його вибухобезпечність та одержання в необхідних кілько-

стях на даний час не забезпечуються.

Тому доцільно вибирати між електричними акумуляторами та механічними накопичувачами енергії – маховиками (МНЕ). В переважній більшості існуючих тракторів використовуються механічні трансмісії. Тому на наш погляд доцільно на прикладі МНЕ розглянути їх вплив на стабілізацію потужності, яку створює дизельний двигун внутрішнього згорання.

Таблиця 2. Порівняльні характеристики накопичувачів енергії

Накопичувач енергії	Характеристики можливої реалізації накопичувача	Запас енергії, кДж	Питомий запас енергії, кДж/кг	Максимальний час роботи на навантаження 100 Вт, хвилин	Термін роботоздатності, роки
Конденсатори	Ємність 1 Ф, напруга 250 В, маса 120 кг	31,25	0,26	5,2	≤20
Копер	Маса 2 т, висота підйому 5 м	100	0,05	16,7	≥20
Вага води	Маса води 10 т, висота стовпа 10 м	1000	0,1	167	≥20
Маховик	Сталевий маховик масою 100 кг, діаметром 0,4 м, товщина 0,1 м	3900	56	650	≥20
Свинцево-кислотний акумулятор	Ємність 190 А×год, напруга 12 В	3900	56	650	3÷5
Пневматичний	Стальний ресивер 1 м <sup>3</sup> , масою 250 кг, тиск 5 МПа	20000	80	3300	≥20

Конструкції вітчизняних тракторів дозволяють кінематично зв'язати маховик з колінчатим валом двигуна через незалежний механізм приводу валу відбору потужності (ВВП) трактора (рис. 2) [5].

Кількість енергії що накопичується маховиком повинна дорівнювати кінетичній енергії  $E_k$  яка затрачається на подолання перевантажень двигуна.

$$E_k = \frac{I_d \cdot (\omega_n^2 - \omega_M^2)}{2} \quad (1)$$

де,  $E_k$  – кінетична енергія, яка затрачається на подолання перевантажень двигуна;  $I_d$  – момент інерції двигуна;  $\omega_n$  – номінальна частота обертання двигуна;  $\omega_M$  – частота обертання двигуна при якій досягається максимальний крутний момент.

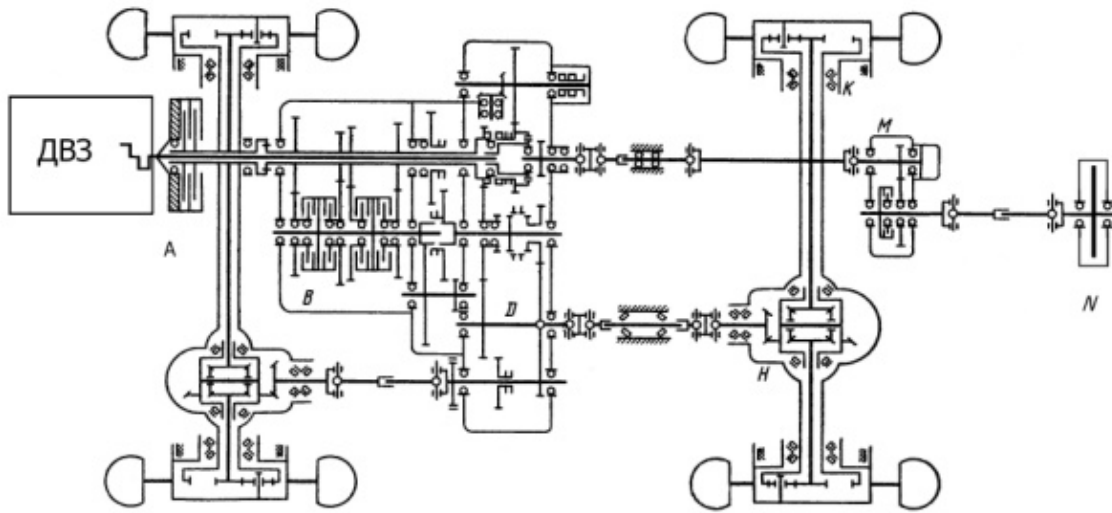


Рис.2. Кінематична схема трансмісії трактора Т-150К з механічним накопичувачем енергії.

Оскільки МНЕ жорстко зв'язаний з двигуном, то при зміні частоти обертання енергія передається до маховика чи повертається від нього. Для визначення залежності величин крутного моменту та потужності в залежності від величини моменту інерції маховика було розроблено динамічну та математичну моделі роботи орного машинно-тракторного агрегату [6]. Розв'язування диференційних рівнянь проводилось в середовищі MathCAD.

За результатами моделювання було одержано поточні величини механічних процесів, які відбуваються в трансмісії МТА. Залежності, які наведено на рис.3 показують, що кількість енергії, яку необхідно накопичувати, доцільно вибрати в певних економічно обґрунтованих межах.

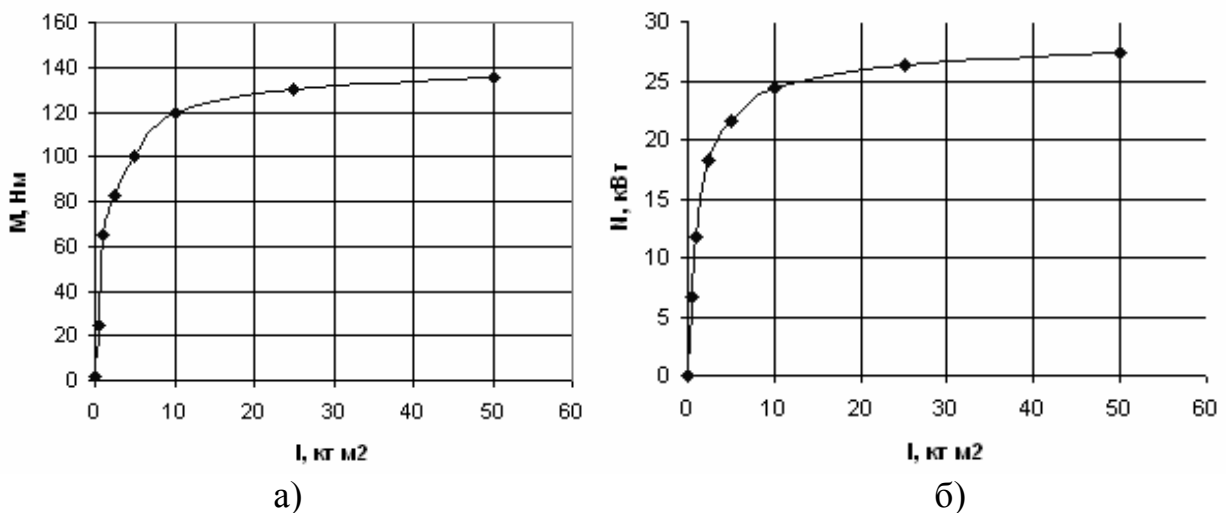


Рис.3. Залежності зміни величин максимальних крутного моменту  $M_m$  (а) та потужності  $N_m$  (б), які виникають в приводі МНЕ при різних значеннях приведенного моменту інерції маховика.

**Аналіз процесів** наведених залежностей показує, що для обраного МТА приведенний момент інерції маховика повинен бути в межах  $5 \dots 10 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ . На рис. 4 показано процеси зміни крутного моменту та потужності в приводі МНЕ при значенні приведенного моменту інерції МНЕ  $5 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ .

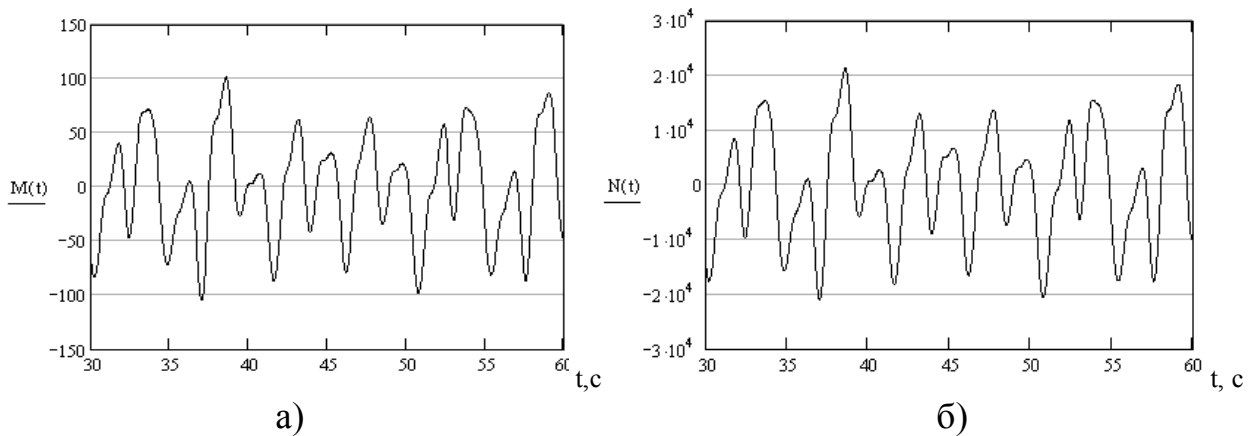


Рис.4. Коливання крутного моменту  $M(t)$  (а), та потужності  $N(t)$  (б), які виникають в приводі МНЕ при  $I_{np}=5 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ .

Аналізуючи залежності (рис. 4 а та б) можемо відмітити, що коливання крутного моменту знаходяться в межах  $\pm 100 \text{ Н}\cdot\text{м}$ , а потужності  $\pm 21 \text{ кВт}$  при зміні частоти обертання в межах  $\Delta n = 190 \text{ об/хв}$ . Розрахунок кількості енергії, яка передається в ланці накопичувача енергії при зміні частоти обертання двигуна, за формулою (1) показує, що вона становить  $23 \text{ кДж}$ . А повний запас енергії МНЕ становить  $134 \text{ кДж}$ .

Таким чином орієнтуючись на дані таблиці 2 можна визначити, що маса конденсаторів повинна складати  $515 \text{ кг}$ , маховика –  $2,4 \text{ кг}$ , свинцевого акумулятора –  $2,4 \text{ кг}$ . Але це суто теоретичні орієнтири, які відповідають ідеальним умовам роботи. В реальних умовах роботи для електричних видів реальних накопичувачів енергії необхідно мати досить дорогі електромашини для з'єднання з механічною трансмісією трактора та системи перетворення і керування енергією, а для механічних конструкцій – суттєві обмеження щодо міцності та якості підшипникових вузлів при високій частоті обертання.

**Синтез конструкції.** Для практичної перевірки роботи МТА з механічним накопичувачем енергії було вибрано трактор типу Т-150К. Для тракторів типу Т-150, ХТЗ-170 привід валу відбору потужності при частоті обертання  $540 \text{ об/хв}$ . може передавати потужність  $60 \text{ кВт}$ , а при частоті  $1000 \text{ об/хв}$ . – всю потужність двигуна. Для підвищення частоти обертання вибрано мультиплікатор з передаточним числом  $6,83$  (головна передача гіпоїдного типу автомобіля ГАЗ-53А). Маховик виготовлено на основі автомобільного колісного диску розміром  $14''$ , який було обмотано сталевим дротом на епоксидному компаунді. Момент інерції такого маховика експериментально визначено методом крутильних коливань. Він становить  $1,8 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ . В перерахунку це складає  $5,5 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$  для приведення до частоти обертання ДВЗ при налаштуванні редуктора ВВП на  $540 \text{ об/хв}$ . А при налаштуванні редуктора ВВП на  $1000 \text{ об/хв}$ . Приведений момент інерції буде  $18,8 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ .

Для спрощення проведення пошукових досліджень МНЕ розміщено на рамі культиватора КПЕ-3,8, як показано на рис. 5.

Загальний вигляд ґрунтообробного МТА з МНЕ показано на рис.6.

Попередні випробування підтвердили роботоздатність макетного зразку МНЕ з трактором Т-150К. В процесі випробувань підтвердилась стабілізація.



Рис.5. З'єднання механічного накопичувача енергії з валом відбору потужності трактора Т-150К.



Рис.6. Машинно-тракторний агрегат у складі трактора Т-150К та культиватора КПЕ-3,8, який обладнано механічним накопичувачем енергії.

### **Висновки.**

1. На підставі аналізу літературних джерел встановлено, що несталий режим роботи ґрунтообробних МТА суттєво впливає на показники надійності та довговічності дизельних ДВЗ.

2. Для зменшення впливу змінного навантаження на режими роботи ДВЗ доцільно енергоємні ґрунтообробні МТА оснащувати додатковими електричними або механічними акумуляторами енергії.

3. Для стабілізації роботи ДВЗ існуючих в експлуатації МТА доцільно пропонувати їх тюнінг за допомогою додаткових механічних накопичувачів енергії (маховиків). При розробці перспективних електричних трансмісій тягово-транспортних засобів сільськогосподарського призначення необхідно використовувати гібридні схеми з сучасними електричними накопичувачами

енергії.

4. Для зменшення необхідної маси додаткового маховика без зменшення запасу кінетичної енергії доцільно використовувати мультиплікатор.

### **Список використаних джерел**

1. И.А. Долгов Тенденции развития конструкций моторно-трансмиссионных установок и сельскохозяйственных тракторов. Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2006, №6.
2. Костин А.К., Пугачев Б.П., Кочинев Ю.Ю. Работа дизелей в условиях эксплуатации: Справочник. – Л.: Машиностроение, Ленингр. Отд-ние, 1989, – 284 с.
3. Повышение эффективности работы тепловозов при применении накопителя энергии в силовой цепи. Автореферат на здобуття вченого ступеню кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.07 Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация Нікіпелій Сергій Олегович Москва 2011 р.
4. А.А. Гольверк, В.Е. Ильченко Исследования режимов работы тракторного двигателя в условиях производственной эксплуатации. – В сб. «Механизация и электрификация сельского хозяйства», вып.22, - К.: Урожай, 1972, с. 33-39
5. Деклараційний патент на корисну модель №57101 «Процес інваріантного формування тягового зусилля машинно-тракторного агрегату» Третяк В.М., Олянічук Р.В, Третяк К.С. 02.2011р.
6. В.М. Третяк, Р.В. Оляднічук, М.В. Третяк. Покращення експлуатаційних характеристик ґрунтообробних машинно-тракторних агрегатів шляхом застосування механічного накопичувача енергії. Механізація та електрифікація сільського господарства. Випуск 94. 2010.

### **Аннотація**

#### **ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ ТРАКТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПУТЕМ СТАБИЛИЗАЦИИ ПОТРЕБЛЯЕМОЙ МОЩНОСТИ.**

**В.М. Третяк, Р.В. Оляднічук, С.П. Погорілий, М.В. Третяк**

*Рассмотрено способ повышения надежности и долговечности тракторных двигателей путем стабилизации влияния неустановившейся нагрузки на режимы работы двигателя.*

### **Abstract**

#### **INCREASE OF RELIABILITY AND DURABILITY OF TRACTOR ENGINES BY STABILIZING POWER CONSUMPTION.**

**V. Tretyak, R. Olyadnichuk, S. Pogoreliy, M. Tretyak**

*The article deals with increase of reliability and durability of tractor engines by stabilizing power consumption.*