

АНАЛІЗ І СИНТЕЗ КОМБІНОВАНИХ МАШИННО-ТРАКТОРНИХ АГРЕГАТІВ ЗА ФУНКЦІОНАЛЬНОЮ ЗНАЧУЩІСТЮ ЕЛЕМЕНТІВ

Лебедев А., д-р. техн. наук, проф.,

e-mail: tiaxntusg@gmail.com , <https://orcid.org/0000-0002-1975-3323>

Лебедева І.,

e-mail: [hfukrndipvt@gmail.com](mailto:hfuksndipvt@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-1349-0702>

Харківська філія УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого

Анотація

Мета дослідження. Дослідження кінематичних властивостей комбінованих машинно-тракторних агрегатів із розробкою рекомендацій щодо їхнього проектування та експлуатації.

Методи дослідження. Методологічною основою роботи є аналіз і синтез комбінованого машинно-тракторного агрегата з розробленням методики визначення найбільш функціонально значущого елемента його конструкції. Для формування наукової проблеми, визначення мети і постановки завдань дослідження використовувався аналітичний метод і порівняльний аналіз із результатами експериментальних досліджень.

Результати дослідження. Сформульовані основні положення аналізу і синтезу комбінованих машинно-тракторних агрегатів мінімальної складності. Розвинута теорія визначення найбільш функційно значимого елемента конструкції комбінованого машинно-тракторного агрегата — єрами трактора. Рішення цієї проблеми виконано у єдності функціонально взаємопов'язаних модулів машинно-тракторних агрегатів: енергетичного (трактор) і технологічного (обладнання, яке агрегатується). Результати дослідження дають змогу на етапі проектування комбінованих машинно-тракторних агрегатів спроектувати конструкцію мінімальної складності.

Висновок. Сформована методологія аналізу і синтезу комбінованого машинно-тракторного агрегата мінімальної складності, розроблена та реалізована методика визначення найбільш функціонально значущого елемента його конструкції. Питання оцінювання навантаження найбільш значущого елемента конструкції комбінованого машинно-тракторного агрегата під час виконання ним технологічного процесу залишається відкритим.

Ключові слова: комбінований машинно-тракторний агрегат, аналіз, синтез, мінімальна складність, значущий елемент, навантаження.

Вступ. Підвищений інтерес виробників і користувачів сільськогосподарської техніки до комбінованих машинно-тракторних агрегатів (МТА) пояснюється можливістю виконання ними за один прохід полем декількох технологічних операцій, унаслідок чого знижується витрата палива на одиницю вирощеної продукції та зменшується ущільнення ґрунту ходовими системами тракторів і сільгоспмашин [Bulgakov, 2022; Погорельий, 1988; Ветохин, 2009; Надикто, 2003; МЭС, 1982; Кушнарёв, 1989; Лебедев, 2021]. У країнах

ЕС та США [Renius, 1983; Wendel, 1985; Vilde, 2002; Szczepaniak, 2008] створення комбінованих сільськогосподарських агрегатів базується на їхній універсальності, в розробку яких покладено принцип блочно-модульного і базового виконання. Такий агрегат є мобільним енергетичним засобом, який об'єднує двигун, силову передачу та пост керування, на базі якого агрегатується обладнання (технологічні модулі) різного функційного призначення. Підвищення ефективності уніфікації елементів МТА значною мірою може

сприяти класифікація всіх складальних одиниць за певними ознаками. Для блочно-модульних агрегатів необхідне вирішення проблеми визначення найбільш значущого елемента конструкції МТА. Елементами МТА можуть бути не лише деталі, а й складальні одиниці, агрегати та сільськогосподарські машини, які агрегуються з трактором. У такому випадку повинна дотримуватися основна умова — технічний рівень блочно-модульних агрегатів, створених на базі уніфікованих і типізованих складальних одиниць, повинен бути не нижчим за рівень кращих аналогів або перевищувати його [Хазов, 1986]. Це твердження реалізовано під час створення та дослідження процесу руху багатоеlementного посівного агрегата, зокрема, оцінено його зв'язок з динамічними параметрами роботи та витратою енергії агрегатом [Антощенков, 2017].

Суттєва особливість визначення найбільш функційно значимих елементів конструкції комбінованого МТА не отримала належного висвітлення в технічній літературі, під час їхнього проектування та виготовлення і ставить нові завдання для вирішення цієї наукової проблеми, спрямованої на реалізацію Технічного регламенту затвердження типу сільськогосподарських і лісогосподарських тракторів [Регламент, 2011].

Комбінований МТА — складна механічна система як сукупність взаємопов'язаних функційно та розташованих у певному порядку елементів. До елементів цього МТА відносяться енергетичний (трактор) і технологічний модулі (обладнання, яке агрегується), що складаються з деталей, рухомих і контактних з'єднань, складальних одиниць. Їхні функційні властивості обумовлюють характеристики жорсткості деталей, податливість конструкції силових

впливів і появу резонансних явищ. Основні функційні характеристики і якісні показники комбінованого МТА закладаються під час їхнього аналізу та синтезу на етапі проектування і доведення без урахування функційної значущості елементів [Анилович, 1966; Renius, 1989]. Цей напрямок не отримав належного висвітлення у технічній літературі, тому виникають нові завдання для вирішення цієї наукової проблеми.

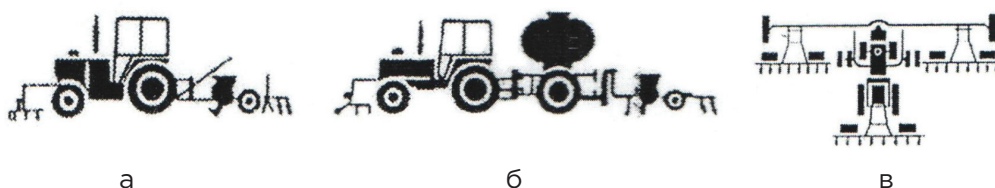
Метою статті є дослідження кінематичних властивостей комбінованих машинно-тракторних агрегатів із розробленням рекомендацій щодо їхнього проектування та експлуатації.

Завдання дослідження:

- обґрунтувати експлуатаційні властивості енергетичного модуля (трактора) комбінованого МТА;
- розробити методику визначення найбільш функційно значимого елемента конструкції комбінованого МТА;
- сформулювати взаємозв'язок між витратами енергії трактора у складі комбінованого МТА і силами, які діють на нього.

Методи і матеріали. Методологічною основою роботи є узагальнення та аналіз відомих наукових результатів стосовно системного підходу аналізу і синтезу комбінованих сільськогосподарських агрегатів. Для формування наукової проблеми, визначення мети і постановки завдань дослідження використовувався аналітичний метод і порівняльний аналіз.

Результати. У комбінованих МТА способи агрегування трактора з сільськогосподарськими (с.-г.) машинами розділяються на три групи (рис. 1):



а, б — для догляду за рослинами під час використання культиваторів на передній навісній системі, культиваторів, які підживлюють рослини, підживлювачів, сівалок і бункерів для технологічних матеріалів; в — посівний з використанням трьох начіпних сівалок

Рисунок 1 – Схема комбінованих МТА на базі трактора і мобільного енергетичного засобу

— серійні одноопераційні машини (знаряддя, послідовно з'єднані між собою зчіпкою);

— установка на рамі моноблочної машини постійних або змінних робочих органів;

— одноопераційні машини / знаряддя, які навішують на передній і задній механізми навішування трактора.

Нині найбільше застосування знайшли комбіновані ґрунтообробні агрегати другої групи. Вони більш компактні й менш металоємні, що дає змогу виготовляти частину машин-знарядь навісними або напівнавісними. За таких умов є можливість використовувати суміжні робочі органи і секції серійних машин-знарядь у необхідному технологічному поєднанні. До їхніх недоліків слід віднести достатньо складну конструкцію рами і більшу кількість робочих органів на ній, які утруднюють обслуговування машини, збільшують вірогідність забивання робочих органів ґрунтом і рослинними залишками, знижують експлуатаційну надійність порівняно з одноопераційними машинами.

Комбіновані агрегати першої групи є перспективними для використання великими господарствами, де є значні площі оброблювання зернових культур (рис. 2).



Рисунок 2 – Комбінований ґрунтообробний посівний агрегат на базі трактора Challenger MT 875 B та посівного комплексу Агро-Союз Horsh

Світовий рекорд під час посіву зернових установлений у агропідприємстві «Агро-Союз» (Дніпропетровська обл.) з використанням трактора Challenger MT 875 (потужність двигуна 570 к. с.) із сівалкою Агро-Союз Horsh (ширина захвату 18,35 м). Показники світового рекорду (загальна за-

сіяна площа за 24 години роботи – 571,9 га, продуктивність агрегата – 24,3 га/год., витрата палива – 3,84 л/га) свідчать про високі експлуатаційно-технологічні показники МТА на базі трактора підвищеної потужності.

Основою комбінованого МТА є енергетичний модуль (трактор), експлуатаційні властивості якого можна розділити на основні та виробничі [Тракторы, 1991]. До основних відносяться N_e , N_n – ефективна й номінальна потужності двигуна, частота обертання валу двигуна ω , годинна витрата палива G , показник буксування δ та радіус тягових коліс r_ϕ (фактичний). Інші показники – швидкість V , гакова потужність $N_{кр}$, тяговий коефіцієнт корисної дії (ККД) η_t , умовний тяговий ККД η'_t , і питома витрата палива – $q_{кр}$ виражають через основні показники:

$$V = \frac{\omega r_\phi}{i_k} (1 - \delta); N_{кр} = P_{кр} V;$$

$$\eta_t = N_{кр} / N_n; \eta'_t = N_{кр} / N_e; \quad (1)$$

$$q_{кр} = G / N_{кр}.$$

Для колісного трактора зі статичним радіусом повороту колеса r_k і передатним відношенням трансмісії i_k швидкість його руху визначається за залежністю

$$V = \frac{\omega r_k}{i_k} (1 - \delta'), \quad (2)$$

$$\text{де } \delta = 1 - \frac{r_\phi}{i_k} (1 - \delta').$$

Використання величини δ' замість δ виключає необхідність визначення r_ϕ . Зважаючи на це, під час моделювання показників експлуатаційних властивостей трактора з урахуванням умов і режиму його роботи у складі комбінованого МТА передбачається розробка моделей основних його показників (ω , G , δ , δ') на основі системного підходу й опису функціонування системи «ґрунт-мобільний енергетичний засіб» із

використанням співвідношень (1) для визначення його похідних показників. Такий підхід до оцінювання функціонування комбінованого МТА є основою аналізу його кінематичних властивостей.

Трактор, який входить до складу комбінованого ґрунтообробного агрегата, є основою багатомірної системи «ґрунт-трактор». У такому випадку трактор необхідно розглядати у взаємозв'язку трьох блоків: двигун, трансмісія, рушій. Для опису функціонування кожного з блоків необхідно знати залежності вихідних показників від відповідних вхідних факторів. Вихідними показниками першого блоку (двигуна) є ω і G , що залежать від моменту опору M_c , який передається від трансмісії, і факторів, які характеризують атмосферні (зовнішні) умови U_a . Функціонування цього блоку системи може бути описане залежністю

$$(\omega, G) = f(M_c, U_a). \quad (3)$$

Функціонування другого блоку (трансмісія) оцінюється за моментом M_k , який реалізується через рушії трактора, і моментом M_g , який реалізується через вал відбору потужності (ВВП):

$$\begin{aligned} M_k &= i_k (M'_c - M'_o) a_i; \\ M_g &= i_g (M''_c - M''_o) a_{ig}, \end{aligned} \quad (4)$$

де i_k, i_g — передавальні відношення коробки передач і редуктора ВВП;

M'_c, M'_o — моменти, що передаються коробкою передач і редуктором ВВП;

M''_c, M''_o — моменти, необхідні для подолання сил тертя у коробці передач і редукторі ВВП;

a_i, a_{ig} — коефіцієнти, які враховують втрати в коробці передач і редукторі ВВП.

Вхідними факторами, які характеризують зовнішні умови роботи третього блоку (рушій) є щільність ґрунту та рельєф поля. Допустимі межі функціонування рушіїв обмежені величиною показника буксування $[\delta]$, а також межею навантаження на керовані $[Q_1]$ і тягові $[Q_2]$ колеса комбінованого МТА:

$$\delta \leq [\delta];$$

$$Q_1 \geq [Q_1]; \quad (5)$$

$$Q_2 = [Q_2].$$

Структурний аналіз системи «ґрунт-мобільний енергетичний засіб (трактор)», який розглядається, свідчить, що для визначення експлуатаційних показників комбінованого МТА схеми побудови під час роботи в заданих умовах необхідно мати у своєму розпорядженні моделі, які описують функціонування кожного з його блоків. Це завдання насамперед зводиться до визначення залежностей частоти обертання колінчастого вала двигуна і годинної витрати палива від моменту опору та зовнішніх умов, а також залежності моменту, який реалізується через рушії трактора і буксування від частоти обертання тягових коліс, тягового навантаження, лінії його дії та інших факторів, які характеризують конструкцію комбінованого МТА.

Під час аналізу та синтезу комбінований МТА зазвичай розглядається як складна механічна система (МС), компонентами якої є не тільки деталі, але й складальні одиниці й агрегати [Тракторы, 1991]. Вартість даних МТА можна значно знизити, якщо застосовувати під час їхнього конструювання (з використанням методів стандартизації та уніфікації) модульний принцип конструювання [Васильев, 1989], створювати конструкційні елементи (КЕ) МТА, як технічні системи (ТС) блоками, модулями, включаючи енергетичні (ЕМ) і технологічні (ТМ) різного рівня складності.

Розглядаючи комбінований МТА як механічну систему, виходимо з того, що кожен його елемент (трактор, с.-г. машина) складається з певних агрегатів ($A_1M, A_2M, \dots, A_jM$), кожен із яких включає в себе декілька складальних одиниць ($C_1A_1M, C_2A_2M, \dots, C_kA_kM$), які, зі свого боку, містять певну кількість деталей ($D_1C_kA_i, D_2C_kA_i, \dots, D_jC_kA_iM$) (рис. 3).

Відповідно до цієї схеми (рис. 3), одна

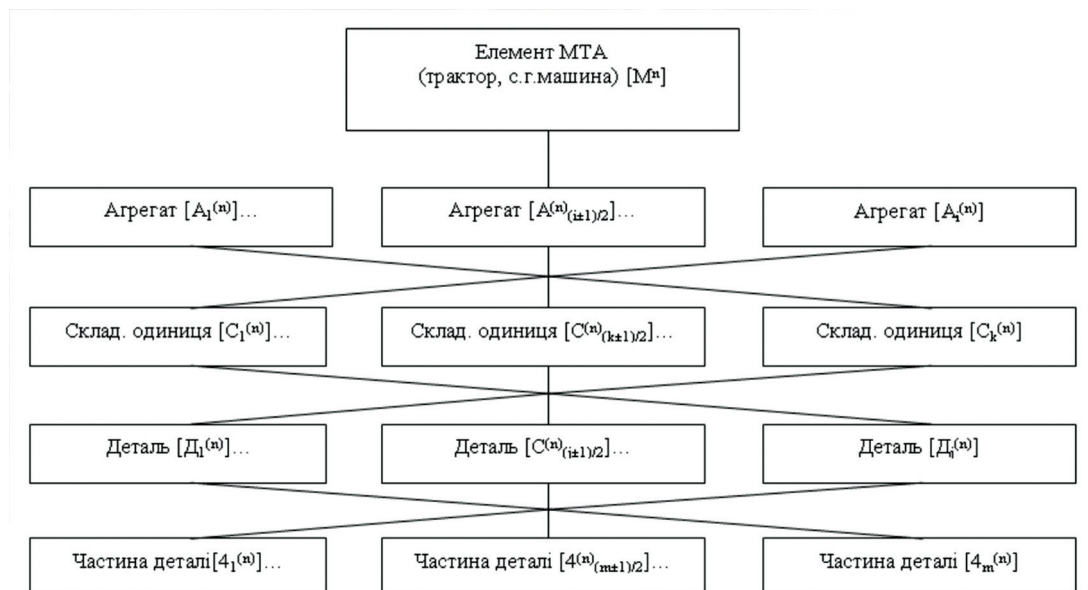


Рисунок 3 – Структурна схема конструювання комбінованого МТА

й та ж деталь входить до різних складальних одиниць, одна й та ж складальна одиниця – до різних агрегатів, що відображає принцип уніфікації й може розглядатися як повторюваність однакових елементів, утворюючи МТА. Навіть окремі частини складних деталей (наприклад, $4D_jC_kA_iM$, $4_2D_jC_kA_iM$, ... , $4_mD_jC_kA_iM$), які враховують характеристику форми, параметри точності й шорсткості, можуть входити до складу різних деталей. Тому кожна зі складальних частин МТА, як ТС, з одного боку, є KE цієї системи, а з іншого – ТС нижчої складності.

У таблиці KE комбінованого МТА розділені на складові частини-деталі або вироби, які виготовляються з матеріалу однієї марки без застосування складальних операцій. Розділені також всі роз'ємні і нероз'ємні (зварні, клепані, напресовані тощо) складальні одиниці (виріб, компоненти якого підлягають з'єднанню між собою на підприємстві-виробнику складальними операціями), за винятком покупних виробів (комплектувальні), які отримує підприємство у готовому вигляді, і виготовлених за технічною документацією заводом-постачальником. Кожен куплений виріб у ході його класифікації враховується одна одиниця, незалежно від кількості деталей, з яких він складається. Із сукупності деталей, які утво-

рюють МТА, і купованих виробів у ході класифікації KE виключені стаціонарні деталі: болти, гвинти, гайки, шайби, шпонки тощо.

У ході аналізу KE комбінованого агрегата МТА за рівнями складності будь-який вузол, складальну одиницю, агрегат-систему, енерготехнологічний агрегат (ЕТА) можна розглядати, з одного боку, як ТС, з іншого – як KE, яка входить до більш складної ТС. Наприклад (табл. 1), T_{c4}^3 – технологічна система 4-го рівня, 3-го типу; X_0^8 – KE 0-го рівня, 8-го типу тощо. За необхідністю представлення в одному рівні виключно однакових KE одного типу позначають: $2T_{c4}^3$, ... , $5T_{c4}^3$ або $2X_{c4}^3$, ... , $5X_{c4}^3$; за різної їхньої конструкції перед індексом їхніх рівнів (с4 та 4) ставлять цифровий індекс – T_{2c4}^3 , ... , T_{4c4}^3 і т. д. як X_{2c4}^3 , ... , X_{4c4}^3 і т. д.

Конструкція будь-якої машини (енергетичної або технологічної) МТА — це складна макросистема ТС 4-го рівня, з багаторівним рівнями складності KE, де той самий же компонент системи, залежно від потреб декомпозиції (ділення), може виступати системою, підсистемою і елементом. Таку модель взаємодії KE можна сформувати на основі уявлення про прямий або декартовий прибуток кінцевого числа множин, який відображає складну ТС і пов'язані між собою відношеннями,

які є формальним відображенням зовнішніх зв'язків, що забезпечують взаємодію:

$$T_c = A \times B \times C \times G = \{ \langle A_{i1}, B_{i2}, C_{i3}, G_{i4} \rangle / A_{i1} \subseteq A; B_{i2} \subseteq B; C_{i3} \subseteq C; G_{i4} \subseteq G \}, \quad (6)$$

де $\langle A_{i1}, B_{i2}, C_{i3}, G_{i4} \rangle$ – впорядковані підмножини, які входять до множин A, B, C, G відповідно, 3-го, 2-го, 1-го і 0-го рівнів складності (агрегат-системи, вузли, складальні одиниці, деталі);

$$i1 = 1, 2, 3, \dots, n1; i2 = 1, 2, 3, \dots, n2; \\ i3 = 1, 2, 3, \dots, n3; i4 = 1, 2, 3, \dots, n4.$$

За таких умов записи співвідношень включення $\subseteq, \in$ визначають входження в системи, які розглядаються A, B, C, G підсистеми $Ai1, Bi2, Ci3, Gi4$, куди входять елементи $T_c a_i, b_i, c_i, g_i$:

$$a1, a2, \dots, ai, \dots, ak1-1, ak1 \in Ai1; \\ b1, b2, \dots, bi, \dots, bk2-1, bk2 \in Bi2; \quad (7)$$

$$c1, c2, \dots, ci, \dots, ck3-1, ck3 \in Ci3;$$

$$g1, g2, \dots, gi, \dots, gk4-1, gk4 \in Gi4.$$

Розглянемо застосування розробленої класифікації на прикладі аналізу і синтезу (складання) МТА для механізації робіт у рослинництві з використанням передньої і задньої начіпної системи базового енергомодуля (трактора) (рис. 1, б). Цей комбінований МТА для догляду за рослинами становить собою складну макросистему, що утворює ТС нижчих рівнів:

$$T_{C6}^1 = T_{C4''}^1 + T_{C3}^{12} + T_{C4'}^2 + T_{C3}^6 + \sum_{k=1}^2 T_{C4^k}^5, \quad (8)$$

де T_{C6}^1 комплекс машин для рослинництва ТС 6-го рівня, 1-го типу;

$T_{C4''}^1$ культиватор підживлювач рослин, начіпна технологічна машина ТС 4''-го рівня, 1-го типу;

Таблиця 1 – Класифікація КЕ комбінованих МТА за рівнями складності

Рівень складності	Елемент конструкції	Тип	Позначення	
			конструктивних елементів	технічних систем
0	Деталі	Виготовлені з листа, сортаменту, штампуванням, згинанням, запозичені, стандартизовані, куповані	$X_0^1, X_0^2, \dots, X_0^{k-1}, X_0^k$	-
1	Складальні одиниці	Виготовлені без зварювання, з механічною обробкою, зварюванням і без механічної обробки, зварюванням і механічною обробкою, куповані	$X_1^1, X_1^2, \dots, X_1^k$	T_{c1}
2	Вузли (збільшені складальні одиниці)	Виготовлені без зварювання і без механічної обробки, ..., запозичені, куповані	$X_2^1, X_2^2, \dots, X_2^k$	T_{c2}
3	Агрегат-системи	Двигун, трансмісія, рама тощо (згідно зі специфікацією), ..., куповані	$X_3^1, X_3^2, \dots, X_3^k$	T_{c3}
4'	Енергетичні машини	Колісні, моноблочні, колісні з поворотним шарніром, ..., куповані	$X_{4'}^1, X_{4'}^2, \dots, X_{4'}^k$	$T_{c4'}$
4''	Технологічні машини	Навісні, причіпні, жорстко стиковані, ..., куповані	$X_{4''}^1, X_{4''}^2, \dots, X_{4''}^k$	$T_{c4''}$
5	Енерготехнологічні агрегати	Для рослинництва, для тваринництва, ..., куповані	$X_5^1, X_5^2, \dots, X_5^k$	T_{c5}
6	Комплекси машин	Для рослинництва, для тваринництва, ..., куповані	$X_6^1, X_6^2, \dots, X_6^k$	T_{c6}
7	Система машин	У сільському господарстві	-	T_{c7}

T_{C3}^{12} передня начіпна система ТС 3-го рівня, 12-го типу;

$T_{C4'}^2$ енергомодуль як ТС 4-го рівня, 2-го типу;

T_{C3}^6 задня начіпна система ТС 3-го рівня, 6-го типу;

$\sum_{k=1}^2 T_{c4^k}^5$ комплекс технологічних машин ТС 4''-го рівня, 5-го типу, добуток із двох множників визначає підживлювач T_{1CC}^5 та сівалку T_{2CC}^5 .

Основним елементом комбінованих МТА є енергомодуль $T_{C4'}^2$, для якого під час аналізу його складності доцільно всі складальні одиниці розділити на три групи: перевтілення і передача енергії, виконання агротехнічних вимог, умов праці тракториста та дотримання техніки безпеки. У такому випадку необхідно враховувати, що складальні одиниці першої групи залежать, в основному, від потужності двигуна внутрішнього згоряння, другої – від маси енергомодуля. Складальні одиниці третьої групи не залежать ні від потужності двигуна, а ні від маси енергомодуля.

За такою класифікацією складальних одиниць енергомодуля (на прикладі трактора серії ХТЗ-170) виокремлюємо КЕ різних рівнів відповідно до таблиці:

- 11 одиниць 3-го рівня (двигун, зчеплення та коробка передач, мости, карданна передача, колеса, рама, задній та передній ВВП, буксирний гак);

- 6 одиниць 2-го рівня (гідросистема, навісна система, рульове керування, гальмівна система, електрообладнання, кондиціонер);

- 7 одиниць 1-го рівня (шестерні, вали, корпусні деталі, тощо);

- 61 одиниця 0-го рівня (деталі кабін, облицювання тощо).

У такому випадку трактор у складі комбінованого МТА є складною макросистемою, з ТС нижчих рівнів:

$$T_{C4'}^2 = \sum_{k=1}^{11} X_3 + \sum_{k=1}^6 X_2 + \sum_{k=1}^7 X_1 + \sum_{k=1}^{61} X_0. \quad (9)$$

На основі вищезазначеного впливає, що остаточне складання виконується

з 11 агрегат-систем, 6 вузлів, 7 груп складальних одиниць, 61 деталі. Послідовне розкладання кожної зі складових формули (9) на КЕ нижчих рівнів дасть змогу визначити типи деталей, способи їхнього виготовлення, матеріали та параметри. Наприклад, останній доданок (9) містить такі якості КЕ: 11 од. 1-го типу, виготовлених механічною обробкою листа ($X_0^1=15$); 5 од. 2-го типу із сортименту ($X_0^2=5$); 7 од. 3-го типу із зазначеним у КД матеріалом, але без способу виготовлення ($X_0^3=7$); 4 од. 4-го типу, виготовлені гнучким штампуванням ($X_0^4=4$), 4 од. 9-го типу з листа ($X_0^9=4$); 20 од. 11-го типу стандартизовані ($X_0^{11}=20$). Це відображається у формулі:

$$\sum_{k=1}^{61} X_0 = \sum_{k=1}^{16} X_0^1 + \sum_{k=1}^5 X_0^2 + \sum_{k=1}^{10} X_0^3 + \sum_{k=1}^{14} X_0^{14} + \sum_{k=1}^4 X_0^9 + \sum_{k=1}^{25} X_0^{11}. \quad (10)$$

Можливий подальший опис конструкції енергозасобу (ЕЗ) з дробленням (диференціацією) параметрів КЕ. Так, деталі 0-го рівня 1-го типу, виготовлені механічною обробкою з листа, можна розділити на групи залежно від марки матеріалу, а кожну групу – на підгрупи, наприклад, за товщиною листа, який застосовується, тощо. За таких умов у позначеннях КЕ кожному кроку диференціації присвоюється буквенний або числовий індекс (наприклад, X_0^{1BA} КЕ 0-го рівня 1-го типу групи В підгрупи А).

Відомості про КЕ, згруповані за визначеними ознаками, вводяться в базу даних і використовуються у ході підготовки виробництва й подальшого конструювання шляхом синтезу ЕЗ, що підвищує ефективність праці конструкторів і технологів, а отже, якість складання та технічний рівень машин, які створюються.

У процесі дослідження розроблено метод побудови моделі «остаточне складання мобільного ЕЗ», який відображає функційну значущість його елементів і складність конструкції. У цьому випадку

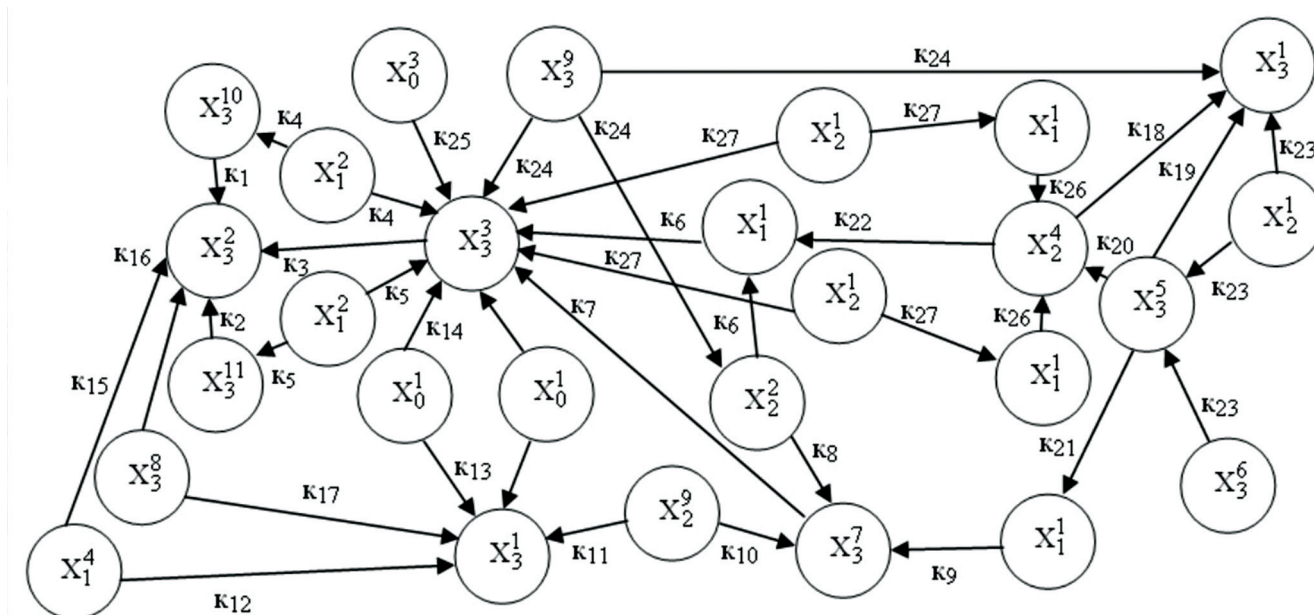


Рисунок 4 – Операційно-технологічний граф процесу складання мобільного ЕЗ комбінованого МТА для рослинництва

окремі графи підсистеми об'єднані в загальний операційно-технологічний граф складання мобільного ЕЗ (рис. 4).

На графі рисунку 4 елементарна комірочка системи ТС – впорядкована пара KE , пов'язана між собою відношенням K_e (комплект збирання: кріпильні та інші деталі, якими з'єднана пара KE , e – індекс, який вказує на порядок операції складання).

Розробленими графами і методом декомпозиції (диференціації) конструкції можна визначити й оптимізувати не лише фіксовані показники KE та $ТС$ (вагу, номенклатуру, матеріал), але й взаємозв'язки між ними. Представлений граф показує, що KE рами ЕЗ (X_3^3) має найбільшу кількість зв'язків з іншими елементами системи, яка визначає найбільшу функційну значимість окремого елемента системи. Це зобов'язує конструктора особливу увагу приділяти цьому вузлу під час створення машини. Дійсно, рама є основним елементом конструкції, яка сприймає ударні навантаження. Окрім того, рама є базою для кріплення інших KE машини. Тому в силовій схемі ЕЗ рама є одним із основних елементів, вихід з ладу якого пов'язаний із трудомісткими й вартісними відновлювальними роботами. Водночас її кон-

струкція повинна підлягати загальному компоновальному задуму.

Виконання таким способом аналізу складності агрегованих із трактором (енергомодулем) сільгоспмашин дає змогу синтезувати з KE та $ТС$ і створювати комбіновані МТА заданого рівня складності.

Обговорення. Результати досліджень спрямовані на розвиток методології аналізу і синтезу комбінованих МТА з розробленням рекомендацій щодо їхнього проектування і експлуатації. Запропоновані нові залежності оцінювання функційних властивостей основних елементів комбінованого МТА (двигуна, трансмісії, рушії) покладені в основу їхнього аналізу і синтезу. Застосування за таких умов теорії графів дає змогу відпрацьовувати загальну методологію проектування складних комбінованих МТА, застосовуючи системний підхід, який алгоритмізує багато процедур проектування, скорочуючи тривалість і вартість розробок. Доведено, що найбільшу функціональну значимість комбінованого МТА для рослинництва має його рама. Це зобов'язує конструктора під час створення комбінованого МТА приділяти особливу увагу цьому елементу.

Водночас необхідно відмітити недостатню кількість наукових робіт щодо

методології оцінювання найбільш значимих елементів конструкції комбінованих МТА з аналізом їхньої навантаженості. Наприклад, рама комбінованого МТА для рослинництва є основним елементом конструкції, який сприймає ударні навантаження. Окрім того, рама є базою для кріплення інших конструкційних елементів МТА, які надають силовий вплив на неї. Це призводить до нестабільності центру ваги трактора.

За таких умов підвищується пасивна (непродуктивна) і знижується активна (корисна) робота МТА.

Суперечності між вимогами агротехніки і розвитком функційних властивостей комбінованих МТА створює об'єктивну складність для їхнього вдосконалення у напрямку забезпечення мінімальної складності й підвищення енергоефективності. Рішення цієї наукової проблеми є невідкладним під час створення комбінованих сільськогосподарських агрегатів.

Висновки. За результатами проведених досліджень аналізу і синтезу комбінованих МТА сформульовано основні теоретичні та науково-практичні висновки.

Методологія аналізу комбінованого МТА на основі оцінювання взаємозв'язку основних його елементів (двигуна, трансмісії, рушія) з урахуванням його експлуатаційних властивостей розробляє моделі (графом) синтезу комбінованих МТА для рослинництва мінімальної складності.

На основі дослідження взаємозв'язку між витратами енергії трактора у складі комбінованого МТА та силами, що діють на нього, встановлено, що найбільш функціонально значущим елементом конструкції комбінованого посівного МТА є рама трактора.

Відкритим залишається питання оцінювання навантаження найбільш функціонально важливого елемента конструкції комбінованого МТА під час виконання ним технологічного процесу.

Перелік літератури

Анилович В. Я., Водолажченко Ю. Т. (1966) Конструкция и расчет с.-х. тракторов. М.: Машиностроение. 520 с.

Антощенков Р. В. (2017) Динаміка та енергетика руху багатоелементних машинно-тракторних агрегатів. Х.: ХНТУСГ. 244 с.

Васильев А. Л. (1989) Модульный принцип формирования техники. М.: Издательство стандартов. 238 с.

Ветохин В. И., Панов Н.М., Шмонин В. А., Юзбашев В. А. (2009) Тягово-приводные комбинированные почвообрабатывающие машины. Киев: Феникс. 264 с.

Кацыгин В. В., Горин Г. С., Зенькович А. А., Кидалинская Г. В., Неверов А. И., Орда А. Н. (1982) Перспективные мобильные энергетические средства. (МЭС) для сельскохозяйственного производства. Мн.: Наука и техника. 272 с.

Кушнарєв А. С., Конєв К. И. (1989) Механико-технологические основы обработки почвы. К.: Урожай. 144 с.

Лебедев А., Лебедев С. (2021) Технологічна адаптація тракторів загального призначення. Техніка і технології АПК. 4 (121). 17–21.

Надыкто В.Т. (2003) Основы агрегатирования модульных энергетических средств. Мелитополь: КП «ММД». 240 с.

Погорелый Л. В. (1988) Сельскохозяйственная техника и технологии будущего. К.: Урожай. 176 с.

Технічний регламент (2011) затвердження типу сільськогосподарських та лісгосподарських тракторів, їх причепів і змінних причіпних машин, систем, складових частин та окремих технічних вузлів, затвердженим постановою Кабінету Міністрів України від 28.12.2011 р. № 1367.

Тракторы (1991) Проектирование, конструирование и расчет. Ксенович И. П., Гуськов В. В., Бочаров Н. Ф. и др.; под общ. ред. Ксеновича И. П. М.: Машиностроение. 544 с.

Хазов Б. Ф., Дидусев Б. А. (1986) Справочник по расчету надежности машин на стадии проектирования. М.: Ма-

шиностроение. 224 с.

Bulgakov, V.; Aboltins, A.; Ivanovs, S.; Beloev, H.; Nadykto, V.; Ihnatiev, Y.; Olt, J. (2022) Theory of Movement of Machine-Tractor Unit with Trailer Haulm Harvester Machine. Appl. Sci. 12, 3901. <https://doi.org/10.3390/app12083901>

Renius K. T. (1983) Erhöhte Arbeitsgeschwindigkeit und Schleppertechnik: Wo liegen die Grenzen. Landtechnik. Bd. 11. 466–469.

Szczepaniak, J. (2008). Simulation calculation of tractor-potato planner combination model. In Proceedings of the 7th International Workshop on Modeling and Applied Simulation, Held at the International Mediterranean Modeling Multiconference, Genova, Italy, 17–19 September 2008; pp. 240–245

Vilde, A. (2002). Development of technologies and machinery for production of sugar beet in Latvia. In Proceedings of the Conference Safe and Economical Agricultural Technologies, Priekule, Latvia; pp. 62–66.

Wendel C. H. (1993) Nebraska Tractor Tests Since 1920. Motorbooks International, Osceola, Wisconsin. 548 p.

References

Anilovich V. Ya., Vodolazhchenko Yu. T. (1966) Design and calculation of agricultural tractors. M.: Mashinostroenie. 520 p.

Antoshchenkov R.V. (2017) Dynamics and energy of motion of multi-element machine-tractor units. H.: KhNTUSG. 244 p.

Bulgakov, V.; Aboltins, A.; Ivanovs, S.; Beloev, H.; Nadykto, V.; Ihnatiev, Y.; Olt, J. (2022) Theory of Movement of Machine-Tractor Unit with Trailer Haulm Harvester Machine. Appl. Sci. 12, 3901. <https://doi.org/10.3390/app12083901>

Katsygin V. V., Gorin G. S., Zenkovich A.A., Kidalinskaya G.V., Neverov A.I., Orda A.N. (1982) Perspective mobile power facilities. (MES) for agricultural production. Mn.: Science and technology. 272 p.

Khazov B. F., Didusev B. A. (1986) Handbook on calculating the reliability of machines at the design stage. M.: Mashinos-

troenie. 224 p.

Kushnarev A. S., Konev K. I. (1989) Mechanical and technological bases of tillage. K.: Harvest. 144 p.

Lebedev A., Lebedev S. (2021) Technological adaptation of general purpose tractors. Machinery and technology of agro-industrial complex. 4 (121). 17–21.

Nadykto V. T. (2003) Fundamentals of aggregation of modular power facilities. Melitopol: KP «MMD». 240 p.

Pogorely L. V. (1988) Agricultural machinery and technologies of the future. K.: Harvest. 176 p.

Renius K. T. (1983) Erhöhte Arbeitsgeschwindigkeit und Schleppertechnik: Wo liegen die Grenzen. Landtechnik. Bd. 11. 466–469.

Technical Regulation (2011) approval of the type of agricultural and forestry tractors, their trailers and replaceable trailers, systems, components and individual technical units, approved by the Cabinet of Ministers of Ukraine dated 28.12.2011 № 1367.

Tractors (1991) Design, construction and calculation / Ksenevich I.P., Guskov V.V., Bocharov N.F. and etc.; under total ed. Ksenevich I.P. M.: Mashinostroenie. 544 p.

Szczepaniak, J. (2008). Simulation calculation of tractor-potato planner combination model. In Proceedings of the 7th International Workshop on Modeling and Applied Simulation, Held at the International Mediterranean Modeling Multiconference, Genova, Italy, 17–19 September 2008; pp. 240–245

Vasiliev A.L. (1989) Modular principle of technology formation. M.: Publishing house of standards. 238 p.

Vetokhin V.I., Panov N.M., Shmonin V.A., Yuzbashev V.A. (2009) Traction-drive combined tillage machines. Kyiv: Phoenix. 264 p.

Vilde, A. (2002). Development of technologies and machinery for production of sugar beet in Latvia. In Proceedings of the Conference Safe and Economical Agricultural Technologies, Priekule, Latvia; pp. 62–66.

Wendel C.H. (1993) Nebraska Tractor Tests Since 1920. Motorbooks International, Osceola, Wisconsin. 548 p.

UDC 631.37–076

ANALYSIS AND SYNTHESIS OF COMBINED MACHINE-TRACTOR UNITS BY FUNCTIONAL SIGNIFICANCE OF ELEMENTS

Lebedev A., D-r of Eng. Scs,

e-mail: tiaxntusg@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1975-3323>

Lebedeva I., ,

e-mail: hfukrndipvt@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1349-0702>

L. Pogoriliy UkrNDIPVT, Kharkiv branch.

Summary

Purpose of the study. Study of the kinematic properties of combined machine-tractor units with the development of recommendations for their design and operation.

Research methods. The methodological basis of the work is the analysis and synthesis of a combined machine-tractor unit with the development of a methodology for determining the most functionally significant element of its design. An analytical method and comparative analysis with the results of experimental studies were used to form a scientific problem, determine the goal and set the objectives of the study.

The results of the study. The main provisions of the analysis and synthesis of combined machine-tractor units of minimal complexity are formulated. A theory has been developed to determine the most functionally significant structural element of a combined machine-tractor unit, which is a tractor frame for a combined sowing unit. The solution of this problem was made in the complex of functionally interconnected modules of machine-tractor units: power (tractor) and technological (aggregated equipment). The results of the study allow at the stage of designing combined machine-tractor units to design its design of minimal complexity.

Conclusions. A methodology for the analysis and synthesis of a combined machine-tractor unit of minimal complexity has been formed, a methodology for determining the most functionally significant element of its design has been developed and implemented. The question of assessing the load of the most significant structural element of the combined machine-tractor unit during the execution of the technological process remains open.

Keywords: combined machine and tractor unit, analysis, synthesis, minimum complexity, significant element, load.