Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research. Kyiv. Ukraine. 2020, Vol. 11, No 2, 187-196
ISSN 2663-1334 (print), ISSN 2663-1342 (online), www.journals.nubip.edu.ua/index.php/Tekhnica

DOI: 10.31548/machenergy.2020.02.187-196

УДК 631.1.004

УЗАГАЛЬНЕНА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ІНДЕКСУ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ МАШИНИ ПРИ ВТРАТІ ЇЇ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ

І. Л. Роговський

Національний університет біоресурсів і природокористування України, Україна.

Стаття з спеціальності: 133 – галузеве машинобудування.

Кореспонденція автора: rogovskii@nubip.edu.ua.

Історія статті: отримано – січень 2020, акцептовано – квітень 2020.
Бібл. 15, рис. 13, табл. 1.

Анотація. В статті проведено аналіз підтримання існуючих сільськогосподарських машин в працездатному стані, за яким слід відпрацювати систему технічного обслуговування з урахуванням умов реформування аграрного сектора. Під технічним обслуговуванням розуміється комплекс робіт по підтриманню роботоздатності або справності виробів при використанні за призначенням шляхом регулювальних, знаючих, заправних і кріпильних робіт. Для оцінки альтернативних варіантів доцільно проводити морфологічний аналіз всієї сукупності можливих рішень досліджуваної проблеми, поданих у вигляді морфологічної матриці, в якій подані основні функції машини і варіанти предметних форм їх виконання.

Теоретичними дослідженнями надали відповідь на два головні питання – як має змінюватися система технічного обслуговування залежно від рівня розвитку аграрного виробництва, а також – які параметри повинна мати система обслуговуючого сервісу, щоб виконувати відповідні втручання з мінімальними технологічно потрібними витратами ресурсів та капіталовкладеннями. Оцінку рівня технічного обслуговування сільськогосподарських машин передбачено виконувати за сукупністю організаційно-технічних факторів, формалізованих через частині і комплексні показники, в два етапи. Перший – оцінка через частині показники по кожному фактору окремо. Другий – оцінка комплексного показника (за всіма факторами в цілому).

Ключові слова: методологія, коефіцієнт готовності, ефективність, сільськогосподарська машина.

Постановка проблеми

Однією з передумов забезпечення працездатності і екологічності сільськогосподарських машин в умовах існуючих обмежень фінансових ресурсів і низьких показників безвідмовності цих машин є пошук раціональних рішень з ефективності технічної експлуатації, які б дозволили виконати необхідні об’єми робіт з технічного обслуговування за мінімальних затратах фінансових і трудових ресурсів [1-4].

Проблема підвищення надійності [5] й ефективного використання сільськогосподарських машин перебуває в тісному зв'язку із проблемою організації й технологією здійснення всіх процесів передбачених системою технічного обслуговування в аграрному виробництві [6, 7]. Раціональна організація експлуатації машин неможлива при відсутності необхідних відомостей про періодичність і технології виконання профілактичних робіт. У цьому зв'язку створення методики обґрунтування періодичності технічного обслуговування є актуальним науково-практичним завданням [8-10].

Вивчення факторів, що виявляють вплив на тривалість роботи даного вузла до моменту, коли доцільно проводити профілактичні роботи показує, що в цьому питанні існує своєрідний принцип невизначеності: чим повніше й точніше враховуються зазначені фактори, тим менш є достовірним отриманий результат. Більш достовірної виявляється періодичність ТО, установлена з урахуванням вимог, сформульована з більш загальних позицій. Наприклад, установлення періодичності здійснення операцій технічного обслуговування з урахуванням вимог раціональної організації використання машин в умовах, що склалися аграрних підприємствах. У зв'язку із цим у дослідженні розпочата спроба врахувати весь основний комплекс факторів, що визначають періодичність технічного обслуговування за даною машиною [11].

Згідно національних стандартів щодо сільськогосподарських машин передбачено проведення певних видів технічного обслуговування, які класифікуються за етапом існування машини і характеризуються чітко регламентованою періодичністю проведення [12]. Однак ці величини періодичності сформовані згідно планово-попереджувальної системи для виробничих умов [6]. Сьогодення потребує нових рішень щодо наукового обґрунтування величин періодичності проведення технічного обслуговування сільськогосподарських

машин і на думку автора вихідним етапом повинна стати формалізація впливу показників надійності.

Аналіз останніх досліджень

Сільськогосподарська машина володіє нескінченним набором властивостей різної природи [13]. Але в процесі дослідження взаємодії людини з сільськогосподарською машиною здійснюється обмеження множини властивостей, які знаходяться в межах можливості їх сприйняття і необхідності для мети досліджень [14]. Отже, в рамках задач управління технічним станом сільськогосподарської машини необхідно розглядати скінченну множину відібраних для спостережень властивостей цієї машини. За чим у кожної сільськогосподарської машини ця множина властивостей буде індивідуальною [15]. Таким чином в рамках задач відновлення працездатності технічного стану сільськогосподарської машини характеризується за допомогою деякого визначеного скінченної множини значень параметрів:

$$S = \{s_1;\ s_2;\ s_3; \dots;\ s_n\}, \qquad (1)$$

де S – індекс технічного стану сільськогосподарської машини; s_n – значення параметру технічного стану сільськогосподарської машини; n – кількість параметрів технічного стану сільськогосподарської машини.

Мета досліджень

Мета досліджень – описати особливості аналітичних підходів до узагальнення математичної моделі індексу технічного стану сільськогосподарської машини при втраті її працездатності.

Результати досліджень

Так як для кожної сільськогосподарської машини множина параметрів індивідуальна, і кожен параметр має свою область значень і одиницю вимірювання, то виникає актуальна задача із систематизації різнорідних даних в задачі відновлення працездатності із застосуванням теорії нечітких множин. При цьому критерії виконання необхідних функцій можуть бути встановлені заданням для кожної функції набору параметрів, які характеризуються здатністю її виконання, і допустимих меж зміни значень цих параметрів (рис. 1). Тобто відновлення працездатності сільськогосподарських машин можна визначити як властивість машини зберігати в часі у визначених межах значення всіх параметрів, які характеризують її спроможність виконувати задані функції.

Під час введення сільськогосподарської машини в експлуатацію значення його параметра s_i рівне номінальному значенню $s_i^{\text{ном. вим.}}$ (рис. 1). Під час експлуатації сільськогосподарської машини значення параметра s_i динамічно змінилось в часі t і знаходиться в визначених межах значень $s_i^{max.\ \text{вим.}} - s_i^{min.\ \text{вим.}}$ (рис. 1). В момент часу t_1 (рис. 1) значення параметра s_i вийшло за допустимі межі – момент переходу сільськогосподарської машини з справного стану в несправний стан. Якщо параметр s_i характеризує здатність сільськогосподарської машини виконувати задані функції, то t_1 – момент переходу працездатності в непрацездатність. Таким чином, сільськогосподарська машина містить певну скінченну множину параметрів або індекс технічного стану сільськогосподарської машини S, значення якого характеризує стан машини:

$$S = \{s_i,\ i = \overline{1,n}\}. \qquad (2)$$

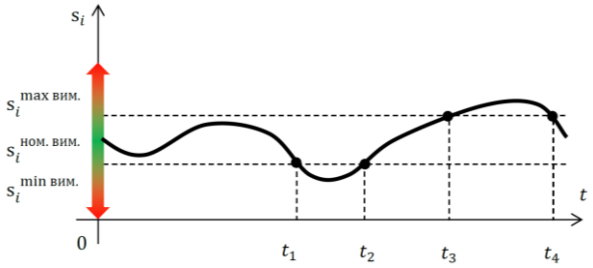

Рис. 1. Графічне пояснення властивості сільськогосподарської машини зберігати в часі у визначених межах значення параметру технічного стану.

Fig. 1. Graphic explanation of the properties of the agricultural machine to keep in time within certain limits the value of the parameter of technical condition.

Індекс технічного стану сільськогосподарської машини S (2) містить певну підмножину параметрів, які характеризують здатність машини виконувати задані функції. Параметр s_i може приймати значення в множині всіх можливих значень se_i, яке містить підмножину заданих значень sa_i:

$$sa_i \subset se_i. \qquad (3)$$

Якщо позначити технічних стан сільськогосподарської машини як SI, то можемо записати:

$$SI = \begin{cases} \text{справний стан, якщо } \forall s_i: s_i \in sa_i\ , \\ \text{несправний стан, якщо } \exists s_i: s_i \notin sa_i. \end{cases} \qquad (4)$$

Зважаючи, що видами технічного стану сільськогосподарської машини є справний і несправний стани, працездатність і непрацездатність та граничний стан (рис. 2), то межі самого технічного стану стають дещо розмитими, особливо це відноситься меж між працездатністю, непрацездатністю та граничним станом.

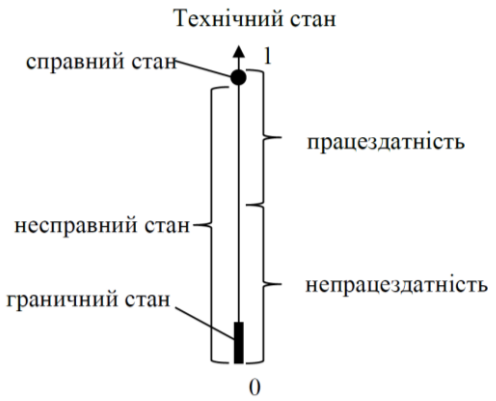

Рис. 2. Інтерпретація графічного представлення технічного стану сільськогосподарської машини.

Fig. 2. Interpretation of the graphical representation of the technical condition of the agricultural machine.

Якщо кількісна оцінка технічного стану сільськогосподарської машини є безрозмірною числова величина індексу технічного стану, яка характеризує стан машини з точки зору відповідності його параметрів нормативним значенням. Згідно загальному алгоритму процесу оцінки, необхідно виміряти поточне значення і порівняти його з нормативом. В ракурсі оцінки технічного стану сільськогосподарської машини даний алгоритм проектується на параметри машини. Для технічно завершених технічних систем, такими встановленими значеннями на практиці є значення, які відрізняються від норм заводів-виробників сільськогосподарських машин, що пояснюється конкретним використанням даної машини в загальній агропромисловій системі виробництва сільськогосподарських культур. В ракурсі описаного підходу отримуємо деяку генеральну сукупність – множину значень, які описують експеримент за процесом оцінки технічного стану сільськогосподарських машин. Таким чином, довільний технічний стан сільськогосподарської машини може бути виражений за допомогою скінченої множини значень індексу технічного стану машини.

Припустимо, що технічний стан сільськогосподарської машини характеризується одним параметром s, тоді в ракурсі теорії множин можемо записати:

$$s \in M, \tag{5}$$

де M – множина значень даного параметра технічного стану сільськогосподарської машини.

Якщо, наприклад, параметр s може приймати довільне невід'ємне значення, тоді:

$$M \in R^{+}, \tag{6}$$

де R^{+} – множина невід'ємних дійсних чисел і відповідно:

$$s \in R^{+}. \tag{7}$$

Якщо M – множина всіх можливих значень параметра, тоді вона має містити деяку підмножину допустимих значень підмножини SL, тоді:

$$SL \subset M. \tag{8}$$

Якщо параметр s множини M і є елемент підмножини SL, тобто значення параметр s знаходиться в допустимому діапазоні значень, тобто:

$$s \in SL, \tag{9}$$

Для виразу цієї приналежності в теорії множин застосовують характеристичну функцію $\vartheta_{LS}(s)$ в бінарному характері її виді (рис. 3), значення якої вказують, і є (так або ні) s елементом підмножини SL:

$$\vartheta_{LS}(s) = \begin{cases} 1, \text{якщо } s \in SL\,, \\ 0, \text{якщо } s \notin SL. \end{cases} \tag{10}$$

На практиці межа між допустимими і недопустимими значеннями параметра може не мати чіткого характеру, тому рішення задачі оцінка технічного стану сільськогосподарської машини раціонально розглянути в ракурсі теорії нечітких множин. Тобто параметр s_i множини M може належати SL у визначеній мірі ϑ_{LS}. Тоді, у відповідності з визначенням нечіткої множини, нечітка підмножина допустимих значень $\widetilde{SL}$ множини всіх можливих значень параметра множини M визначається як множина упорядкованих пар:

$$\{(s, \vartheta_{\widetilde{LS}}(s))\}, \forall s \in M, \tag{11}$$

де $\vartheta_{\widetilde{LS}}(s)$ – характеристична функція приналежності, яка приймає свої значення в множині $H = \{0; 1\}$ в нечіткій підмножині $\widetilde{H}$.

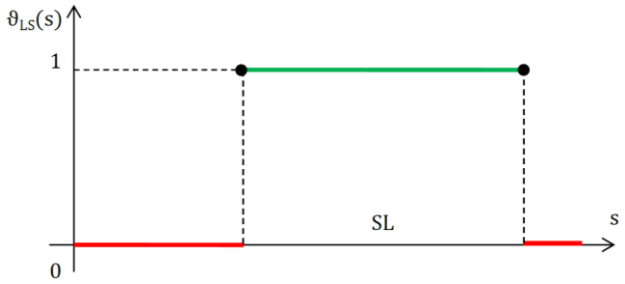

Рис. 3. Інтерпретація графічного представлення характеристичної функції $\vartheta_I(s)$ технічного стану сільськогосподарської машини.

Fig. 3. Interpretation of the graphical representation of the characteristic function $\vartheta_I(s)$ of the technical condition of the agricultural machine.

З врахуванням того, що сільськогосподарська машина має не один s, а кілька параметрів s_i, за яким вона і оцінюється, тоді необхідно відмітити наступне. Кожен параметр s_i унікальний, тобто він має свою множину всіх можливих значень, підмножину нормативних значень, а також розмірність. Тоді модель опису технічного стану сільськогосподарської машини підмножини SL буде мати наступний вид:

$$\widetilde{SL} = \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline s_1 & s_2 & \dots s_i & s_n \\ \hline \vartheta_{\widetilde{SL}_1}(s_1) & \vartheta_{\widetilde{SL}_2}(s_2) & \dots \; \vartheta_{\widetilde{SL}_i}(s_i) & \vartheta_{\widetilde{SL}_n}(s_n) \\ \hline \end{array} \tag{12}$$

Однак (12) потребує на практиці застосування не однієї функції приналежності при опису технічного стану сільськогосподарської машини, а деяких (для кожного параметра свій), тобто кожен параметр може мати рівні одиниці вимірювання або взагалі бути безрозмірною величиною, різні допустимі для умов експлуатації значення, діапазон можливих значень, але кожен з цих параметрів характеризує стан сільськогосподарської машини і має бути врахований. Таким чином, якщо в моделі (12) будуть проставлені у відповідності всі поточні значення параметрів $s_i^{\text{пот}}$, тоді множина $\widetilde{SL}$ буде характеризувати поточний технічний стан сільськогосподарської машини $\widetilde{SL}^{\text{пот}}$:

$$\widetilde{SL}^{\text{пот}} = \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline s_1 & s_2 & \dots s_i & s_n \\ \hline \vartheta_{\widetilde{SL}_1}(s_1^{\text{пот}}) & \vartheta_{\widetilde{SL}_2}(s_2^{\text{пот}}) & \dots \; \vartheta_{\widetilde{SL}_i}(s_i^{\text{пот}}) & \vartheta_{\widetilde{SL}_n}(s_n^{\text{пот}}) \\ \hline \end{array} \tag{13}$$

Якщо технічний стан сільськогосподарської машини справний за всіма параметрами, то її стан $\overline{SL}^{\text{ном}}$ можна описати наступним видом:

$$\widetilde{SL} = \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline s_1 & s_2 & \dots s_i & s_n \\ \hline 1 & 1 & \dots 1 & 1 \\ \hline \end{array} = \overline{SL}^{\text{ном}} \tag{14}$$

Для визначення узагальненого технічного стану сільськогосподарської машини використовуємо дві оцінки – відносну лінійну відстань Хеммінга і відносну квадратичну Евклідову відстань між множинами $\widetilde{SL}^{\text{пот}}$ і $\overline{SL}^{\text{ном}}$, за якими встановлюємо дві оцінки відстані між нечіткими множинами.

Відносна лінійна відстань Хеммінга $\delta(\widetilde{SL}^{\text{пот}}, \overline{SL}^{\text{ном}})$ між множинами $\widetilde{SL}^{\text{пот}}$ і $\overline{SL}^{\text{ном}}$ визначається за виразом:

$$\delta\left(\widetilde{SL}^{\text{пот}},\overline{SL}^{\text{ном}}\right)=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|\vartheta_{\widetilde{SL}^{\text{ном}}}(s_i)-\vartheta_{\widetilde{SL}^{\text{пот}}}(s_i)\right|=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(1-\vartheta_{\widetilde{SL}^{\text{пот}}}(s_i)\right). \quad (15)$$

або після перетворень

$$\delta\left(\widetilde{SL}^{\text{пот}},\overline{SL}^{\text{ном}}\right)=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(1-\vartheta_{\widetilde{SL}^{\text{пот}}}(s_i)\right)=\frac{1}{n}\left(n-\sum_{i=1}^{n}\vartheta_{\widetilde{SL}^{\text{пот}}}(s_i)\right). \quad (16)$$

Очевидно, що $\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(1-\vartheta_{\widetilde{SL}^{\text{пот}}}(s_i)\right)$ – середнє арифметичне $\vartheta^{\text{с.а.}}_{\widetilde{SL}^{\text{пот}}}(s_i)$ всіх значень $\vartheta_{\widetilde{SL}^{\text{пот}}}(s_i)$ тоді:

$$\delta\left(\widetilde{SL}^{\text{пот}},\overline{SL}^{\text{ном}}\right)=1-\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\vartheta_{\widetilde{SL}^{\text{пот}}}(s_i)=1-\vartheta^{\text{с.а.}}_{\widetilde{SL}^{\text{пот}}}(s_i). \quad (17)$$

Відносна квадратична Евклідова відстань між множинами $\widetilde{SL}^{\text{пот}}$ і $\overline{SL}^{\text{ном}}$ визначається за виразом:

$$\varepsilon\left(\widetilde{SL}^{\text{пот}},\overline{SL}^{\text{ном}}\right)=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\vartheta_{\overline{SL}^{\text{ном}}}(s_i)-\vartheta_{\widetilde{SL}^{\text{пот}}}(s_i)\right)^2}=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(1-\vartheta_{\widetilde{SL}^{\text{пот}}}(s_i)\right)^2}. \quad (18)$$

Обидва вирази (17) і (18) задовольняють умовам:

$$0\le\delta\left(\widetilde{SL}^{\text{пот}},\overline{SL}^{\text{ном}}\right)\le 1, \quad (19)$$

$$0\le\varepsilon\left(\widetilde{SL}^{\text{пот}},\overline{SL}^{\text{ном}}\right)\le 1. \quad (2.20)$$

Таким чином, за допомогою $\delta\left(\widetilde{SL}^{\text{пот}},\overline{SL}^{\text{ном}}\right)$ і $\varepsilon\left(\widetilde{SL}^{\text{пот}},\overline{SL}^{\text{ном}}\right)$ можемо не тільки оцінити загальний стан сільськогосподарської машини, але й порівняти сільськогосподарські машини між собою. Очевидно, що чим менші ці відстані $\delta\left(\widetilde{SL}^{\text{пот}},\overline{SL}^{\text{ном}}\right)$ і $\varepsilon\left(\widetilde{SL}^{\text{пот}},\overline{SL}^{\text{ном}}\right)$ тим технічний стан сільськогосподарської машини ближче до справного стану S_{LS}:

$$S_{LS}=1-\delta\left(\widetilde{SL}^{\text{пот}},\overline{SL}^{\text{ном}}\right)=\vartheta^{\text{с.а.}}_{\widetilde{SL}^{\text{пот}}}(s_i), \quad (19)$$

Розглянемо фактичні дані зазору між ножем і протирізальним брусом жниварки зернозбирального комбайна.

	s_1	s_2	s_3	s_4
$\widetilde{SL}_1^{\text{пот}}=$	0,5	0,5	0,5	0,5

і

	s_1	s_2	s_3	s_4
$\widetilde{SL}_2^{\text{пот}}=$	0,1	0,5	0,5	0,9

Тоді $\delta\left(\widetilde{SL}_1^{\text{пот}},\overline{SL}_1^{\text{ном}}\right)=0{,}5$, а $\delta\left(\widetilde{SL}_2^{\text{пот}},\overline{SL}_2^{\text{ном}}\right)=0{,}5$.

Тобто оцінка по лінійним відстаням не відтворює різниці в технічному стані окремих ножів. Але, за положеннями теорії надійності, технічний стан другого ножа гірший, так як існує параметр $s_1=0{,}1$, тобто ймовірність виникнення відмови в даному випадку найвища. При цьому Тоді $\varepsilon\left(\widetilde{SL}_1^{\text{пот}},\overline{SL}_1^{\text{ном}}\right)=0{,}5$, а $\varepsilon\left(\widetilde{SL}_2^{\text{пот}},\overline{SL}_2^{\text{ном}}\right)\approx 0{,}6$.

Даний приклад демонструє доцільну властивість відносної квадратичної Евклідової відстані, яку зручно використовувати в якості додаткової оцінки технічного стану сільськогосподарської машини. Але на практиці відносна лінійна відстань Хеммінга все ж таки є більш зручною в застосуванні через свою простоту і підвищеною продуктивністю при значних об'ємах даних.

Розглянемо фактичні дані технічного стану блоку живлення електромагнітного перепускного клапана паливного насоса високого тиску кормозбирального комбайна: термін експлуатації, 8 років; вихідна напруга, 11,5В, пульсація вихідної напруги 400 мВ. Таким чином, за виразом (1) маємо:

$$S=\{8\text{ років};\ 11{,}5\text{ В};\ 400\text{ мВ}\}, \quad (21)$$

Подібний опис (21) технічного стану блоку не дозволяє дати інтегральну оцінку, а також порівняти блоки між собою. Тому формуємо табличні данні (табл. 1) допустимими значеннями параметрів з документації на блок.

Таблиця 1. Допустимі вихідні параметри.
Table 1. Valid initial parameters.

Назва параметру, розмірність	Поточне значення	Допустиме значення	
		мінімальне	максимальне
Термін експлуатації, років	8	0	1S0
Вихідна напруга, В	11,5	11,0	12,0
Пульсація вихідної напруги, мВ	400	0	1000

Для побудови нечіткої моделі втрати працездатності блоку необхідно кожному параметру (табл. 1) поставити у відповідності визначену функцію приналежності (рис. 4, рис. 5, рис. 6).

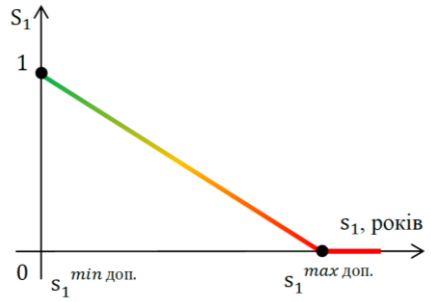

Рис. 4. Функція приналежності для параметра «Термін експлуатації» s_1.

Fig. 4. Accessory function for the "Service life" parameter s_1.

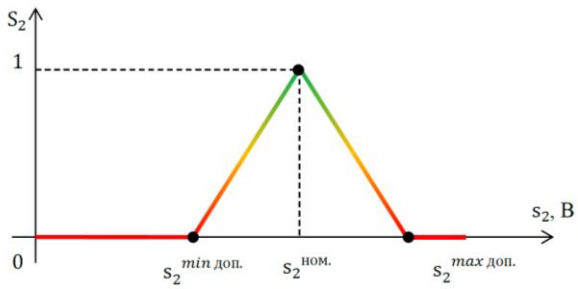

Рис. 5. Функція приналежності для параметра «Вихідна напруга» s_2.

Fig. 5. Accessory function for the "Output voltage" parameter s_2.

Знаючи функцію приналежності $S_1(s_1)$ і поточне значення параметра $s_1=6$ років, визначимо S_1 (рис. 4) за виразом:

$$S_1=\begin{cases}0 \text{ при } s_1>s_1^{\max\text{ доп.}}\\ -\frac{s_1}{s_1^{\max\text{ доп.}}}+1 \text{ при } 0\le s_1\le s_1^{\max\text{ доп.}}\end{cases}=0{,}40 \quad (22)$$

Знаючи функцію приналежності $S_2(s_2)$ і поточне значення параметра $s_2 = 11{,}5$ В, визначимо S_2 (рис. 5) за виразом:

$$S_2 = \begin{cases} 0 \text{ при } s_2^{\min\text{ доп.}} \geq s_2 \text{ або } s_2 \geq s_2^{\max\text{ доп.}} \\ \frac{2\cdot\left(s_2 - s_2^{\min\text{ доп.}}\right)}{s_2^{\max\text{ доп.}} - s_2^{\min\text{ доп.}}} \text{ при } s_2 \leq \frac{s_2^{\max\text{ доп.}} + s_2^{\min\text{ доп.}}}{2} \\ \frac{2\cdot\left(-s_2 + s_2^{\max\text{ доп.}}\right)}{s_2^{\max\text{ доп.}} - s_2^{\min\text{ доп.}}} \text{ при } s_2 > \frac{s_2^{\max\text{ доп.}} + s_2^{\min\text{ доп.}}}{2} \end{cases} = 1{,}00 \quad (23)$$

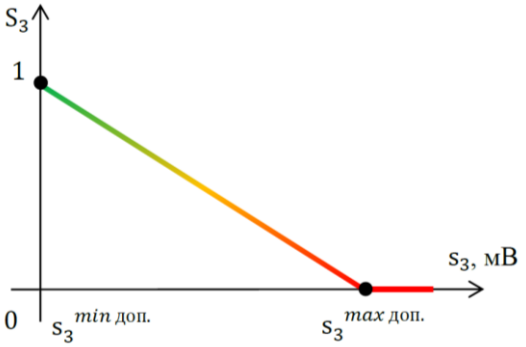

Рис. 6. Функція приналежності для параметра «Пульсація вихідної напруги» s_3.

Fig. 6. Accessory function for the "Output voltage ripple" parameter s_3.

Відсутність диктату застосування якого-небудь визначеного виду функції приналежності має свою альтернативність (рис. 7), коли весь діапазон від $s_2^{\min\text{ доп.}}$ до $s_2^{\max\text{ доп.}}$ рівне одиниці, однак ця функція приналежності доповнюється двома точками мінімальним критичним значенням $s_2^{\min\text{ крит.}}$ і максимальним критичним значенням $s_2^{\max\text{ крит.}}$. Дані значення в більшості випадків будуть носити експертний характер, так як ці значення можуть бути відсутні в нормативах на блок.

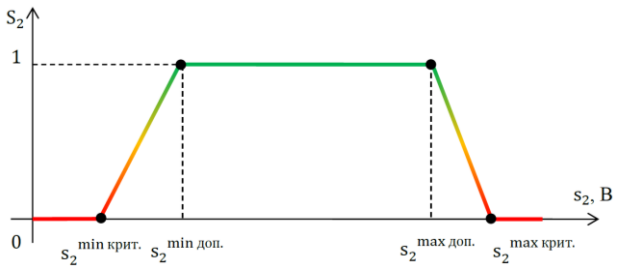

Рис. 7. Альтернативна функція приналежності для параметра «Вихідна напруга» s_2.

Fig. 7. Alternative accessory function for the parameter "Output voltage" s_2.

Знаючи функцію приналежності $S_3(s_3)$ і поточне значення параметра $s_3 == 400$ мВ, визначимо S_3 (рис. 6) за виразом:

$$S_3 = \begin{cases} 0 \text{ при } s_3 > s_3^{\max\text{ доп.}} \\ -\frac{s_3}{s_3^{\max\text{ доп.}}} + 1 \text{ при } 0 \leq s_3 \leq s_3^{\max\text{ доп.}} \end{cases} = 0{,}60 \quad (24)$$

Таким чином, технічний стан блоку живлення електромагнітного перепускного клапана паливного насоса високого тиску кормозбирального комбайна можемо описати за допомогою множини індексів:

$$S = \{0{,}40;\ 1{,}00; 0{,}60\} = 0{,}66. \quad (25)$$

Також в якості параметра технічного стану може виступати статистичні дані параметрів, які не є винятком, тобто показники надійності. Так технічний стан блоку живлення електромагнітного перепускного клапана паливного насоса високого тиску кормозбирального комбайна окрім трьох параметрів (табл. 1) оцінюється ще четвертим «Середній наробіток до відмови» (рис. 8). Згідно нормативу на цей блок його середній наробіток до відмови не повинен бути менше 1000 годин, але згідно хронометражних досліджень, поточне значення даного параметра 950 годин.

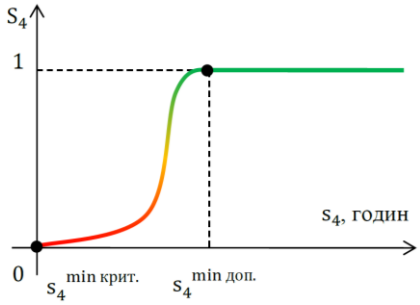

Рис. 8. Функція приналежності для параметра «Середній наробіток до відмови» s_4.

Fig. 8. The membership function for the parameter "Average operating time before failure" s_4.

В якості залежності $S_4(s_4)$ обрано нормальний розподіл Гаусса. Як і в попередніх прикладах функцій приналежності, залежність $S_4(s_4)$ може бути іншою, однак в даному випадку проведені експериментальні дослідження ($\sigma = 0{,}4$) дозволяють застосувати криву Гаусса. Отже, функція приналежності $S_4(s_4)$ буде мати такий вид:

$$S_4 = \begin{cases} 1 \text{ при } s_4 > s_4^{\min\text{ доп.}} \\ \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\left(s_4 - s_4^{\max\text{ доп.}}\right)^2}{2\sigma^2}} \text{ при } 0 \leq s_4 \leq s_4^{\min\text{ доп.}} \end{cases} \approx 0{,}46. \quad (26)$$

Таким чином, технічний стан блоку живлення електромагнітного перепускного клапана паливного насоса високого тиску кормозбирального комбайна можемо описати за допомогою множини індексів:

$$S = \{0{,}40;\ 1{,}00; 0{,}60; 0.46\} = 0{,}62. \quad (27)$$

Параметр «Середній наробіток до відмови» допоміг уточнити технічний стан блоку.

Становиться очевидним зручність застосовування запропонованих моделей, за якими оцінка технічного стану сільськогосподарської машини ведеться по певній скінченій множині параметрів, що встановлені в нормативній документації на цю машину заводом-виробником. Дана сільськогосподарська машина завжди виконує яку-небудь функцію. Ступінь виконання цієї функції оцінюють за вихідними даними, які мають різнотипний характер. Це можуть бути дані інструментальні, тобто ті, що можна виміряти за допомогою засобів вимірювання, статистичні, тобто ті, розрахунок яких проводять протягом певного часу, і частіше, мають математичний характер, та експертні, тобто ті, які відносяться до суб'єктивної думки. Для обробки і аналізу цих

різнорідних даних застосуємо нечітку модель надійності через структурно-параметричний метод аналізу ієрархій, тобто розглянути параметри технічного стану сільськогосподарської машини, як набір елементів.

Таким чином, щоб отримати оцінку технічного стану сільськогосподарської машини, яка складається із множини елементів, необхідно оцінити технічний стан кожного елемента, а системи окремо за параметрами, які встановлені для кожного елемента, потім визначити індекс технічного стану вищестоячих в ієрархії структур системи (рис. 9) застосувавши лінійну відстань Хеммінга та принцип відносності: система нижнього рівня є елементом системи більш високого рівня, даний метод транслюємо на довільний рівень в рамках структури системи:

$$S = \frac{\sum_{i=1}^{N} S_i}{N},\ S_i = \frac{\sum_{j=1}^{C_i} S_{ij}}{C_i},\ S_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^{B_{ij}} S_{ijk}}{B_{ij}}, \quad (28)$$

де N – кількість підсистем в системі; C_i – кількість елементів i-ї підсистеми в системі; B_{ij} – кількість параметрів j-их елементів i-ї підсистеми в системі; S_{ij} – індекс технічного стану сільськогосподарської машини j-их елементів i-ї підсистеми в системі; S_{ijk} – індекс технічного стану сільськогосподарської машини за k-им параметром j-их елементів i-ї підсистеми в системі.

Рис. 9. Структурно-параметрична схема системи оцінки індекса технічного стану сільськогосподарської машини.

Fig. 9. Structural and parametric scheme of the evaluation system of the index of technical condition of the agricultural machine.

Тобто (28), стан елемента системи є одним з параметрів оцінки цієї системи. Адекватність запропонованого підходу обґрунтована тим, що вагомість кожного параметра однаковий, а також ти фактом, що кількість даних параметрів і безпосередньо самі параметри, за якими необхідно оцінювати технічних стан, визначаються суб'єктом оцінки: заводом-виробником, інженером виробничого агропідприємства, випробувальною установою. Тобто, якщо даний параметр не важливий в рамках оцінки технічного стану сільськогосподарської машини, то нема необхідності його враховувати. Так як індекси технічного стану це, перш за все, індикатори для порівняння машин між собою, тоді апарат визначення в такому випадку не має принципового впливу, основна умова це застосування єдиного апарату для всього комплексу. На цій основі будуємо нечітку модель системи відновлення працездатності сільськогосподарської машини (рис. 10: s_{ijk} – значення технічного k-го параметра j-го елемента i-ї підсистеми в системі).

При цьому кожен з видів технічного стану характеризується сукупністю значень параметрів, які описують стан сільськогосподарської машини, і якісних ознак. Номенклатура цих параметрів і ознак, а також меж їх допустимих значень встановлюється в нормативній документації на дану сільськогосподарську машину.

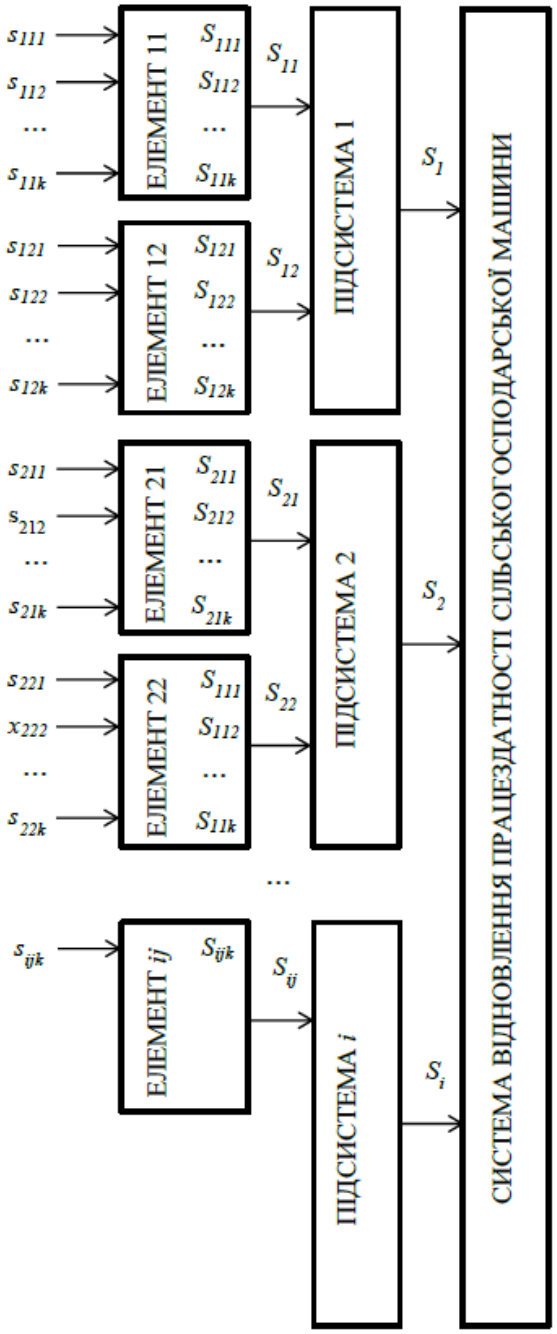

Рис. 10. Нечітка модель системи відновлення працездатності сільськогосподарської машини.

Fig. 10. Fuzzy model of the system of restoration of working capacity of the agricultural machine.

Очевидно (рис. 10), що ці параметри можуть бути як кількісні зі своїми одиницями виміру, так і якісними. Нечітка модель надійності дозволяє знищити розмірність цих ознак і уникнути дискретних видів технічного стану сільськогосподарської машини. Згідно нечіткої моделі надійності, щоб отримати оцінку технічного стану сільськогосподарської машини, яка складається з множини елементів, необхідно оцінити технічний стан кожного елемента в окремості за параметрами, що встановлені для кожного елемента, і лише потім визначати інтегральний індекс технічного стану вищестоящих в ієрархії структур системи відновлення працездатності сільськогосподарської машини. В даному випадку необхідно провести аналіз ступеня прояви властивості адитивності і цілісності в запропонованій системі (рис. 10).

Відомо, що без забезпечення достатньої цілісності в системі не можуть проявлятись системні властивості, необхідні для її зберігання і розвитку. Однак у випадку більшої цілісності система буде подавляти елементні властивості і може втрати частину з них. В то й же час при розгляді лише елементних властивостей, при адитивності цих властивості можуть виникати різні протиріччя, і ці властивості не будуть проявлятись в системі.

Закономірності емерджентності проявляються в системі у виді виникнення у неї нових властивостей відсутніх елементів:

- властивість системи не є простою сумою властивостей складових її елементів;
- властивості системи залежить від властивостей складових її елементів;
- об'єднанні в систему елементи, як правило, втрачають частину своїх властивостей, притаманних їх поза системи, тобто система подавляє ряд властивостей елементів, але елементи, потрапивши в систему, можуть набути нових властивостей.

Таким чином, зміни, що пов'язані з втратою елементами деяких властивостей, коли вони стають елементами системи, бувають настільки істотними, що можливо коли властивості системи взагалі не залежать від властивостей елементів.

Становиться очевидним, що властивість емерджентності пов'язано з ціллю, для виконання якої розробляється система. Тому так важливо з усієї безкінечної множини властивостей виділяти і розглядати тільки ті, що важливі для досягнення цілі в агровиробничих системах. Тому може існувати певна технічна система з трьох елементів (рис. 11). При цьому технічний стан «Елемента 1» оцінюється за двома параметрами s_{111} і s_{112}, технічний стан «Елемента 2» оцінюється за одним параметром s_{121}, технічний стан «Елемента 3» оцінюється за двома параметрами s_{131} і s_{132}:

$$S_{11} = \{s_{111}, s_{112}\}, \quad (29)$$

$$S_{12} = \{s_{121}\}, \quad (30)$$

$$S_{13} = \{s_{131}, s_{132}\}, \quad (31)$$

$$S_1 = \{S_{11}, S_{12}, S_{13}\}. \quad (32)$$

Вирази (29)-(32) як раз показують випадок абсолютної адитивності системи. Тепер припустимо, що на технічний стан системи впливають не тільки елементарні параметри, але і один системний. Так як параметр системний, то і його значимість вища, ніж у елементних параметрів, або цей системний параметр є таким же елементом системи (рис. 12).

Рис. 11. Технічна система з трьох елементів.

Fig. 11. Technical system of three elements.

Рис. 12. Технічна система з трьох елементів та системним параметром.

Fig. 12. Technical system with three elements and system parameter.

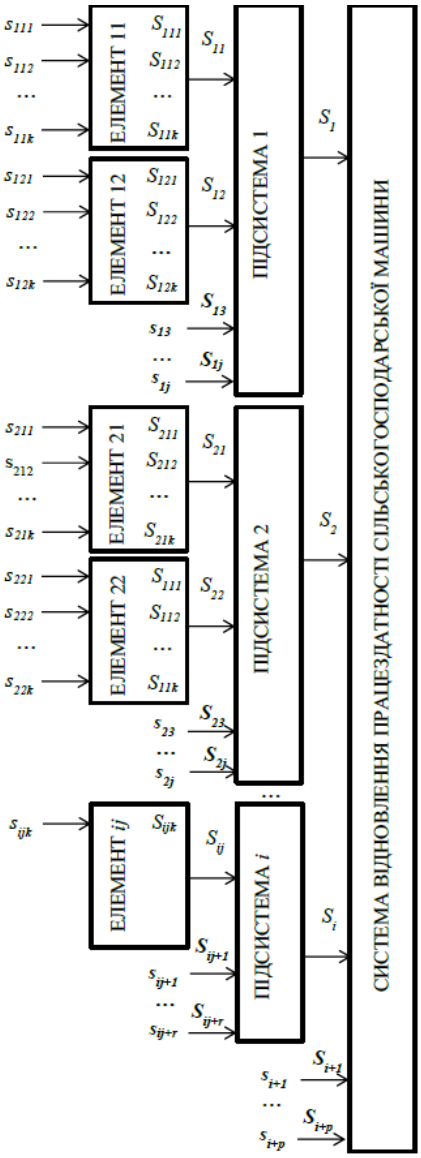

Рис. 13. Модифікована нечітка модель системи відновлення працездатності сільськогосподарської машини.

Fig. 13. Modified fuzzy model of the system of restoration of working capacity of the agricultural machine.

Тоді справедливим буде:

$$S_{11} = \{s_{111}, s_{112}\}, \quad (33)$$

$$S_{12} = \{s_{121}\}, \quad (34)$$

$$S_{13} = \{s_{131}, s_{132}\}, \quad (35)$$

$$S_1 = \{S_{11}, S_{12}, S_{13}, S_{14}\}. \quad (36)$$

Самі по собі «Елемент 1», «Елемент 2», «Елемент 3» є параметрами для «Системи 1» поряд з «Параметром 14». Результат легко узагальнюється для довільної ієрархічної структурованої моделі. В концептуальній моделі необхідно врахувати можливість добавлення системних параметрів на довільних рівнях. Саме це, в кінцевому ітозі, дозволяє забезпечити баланс між адитивністю і емерджентністю (рис. 13).

На рис. 13 видно, що для оцінки технічного стану підсистеми 1 необхідно оцінити технічний стан складових її елементів, а також оцінити підсистему за множиною системних параметрів $\{s_{13}, \dots, s_{1j}\}$.

Вищесказане справедливо і для підсистеми 2: для оцінки технічного стану підсистеми 2 необхідно оцінити технічний стан складових її елементів, а також оцінити підсистему за множиною системних параметрів $\{s_{23}, \dots, s_{2j}\}$.

В ієрархії коден системний параметр знаходиться на одному рівні з елементами даної підсистеми.

Узагальнив, можемо відмітити, що множина $\{s_{ij+1}, \dots, s_{ij+r}\}$ – це множина системних параметрів, на основі яких оцінюють технічний стан підсистеми, множина $\{s_{i+1}, \dots, s_{i+p}\}$ – це множина системних параметрів, на основі яких оцінюють технічний стан системи.

В ієрархії кожен системний параметр $\{s_{i+1}, \dots, s_{i+p}\}$ знаходиться на одному рівні з підсистемою даної системи.

Висновки

1. Формалізовано фізичне поняття технічного стану сільськогосподарської машини в математичних поняттях теорії нечіткої множини за допомогою індексу технічного стану і може знаходитись в довільному технічному стані в множині від 0 до 1 (справний стан).

2. Нечітка модель надійності сільськогосподарської машини, як складної технічної системи, дозволяє здійснити структурно-параметричний аналіз і систем системи та ідентифікувати її технічний стан.

3. Запропонована модель оцінки технічного стару сільськогосподарської машини – нечітка модель надійності – дозволяє вирішити проблему непорівнянності машин між собою.

4. Навіть при умові різної кількості параметрів, за якими відбувається оцінка технічного стану сільськогосподарської машини, з допомогою системи індексів наявна можливість порівняння (ранжування) сільськогосподарських машин по узагальнюючому признаку – технічному стані.

Список літератури

1. *Sergejeva N., Aboltins A., Strupule L., Aboltina B.* Mathematical knowledge in elementary school and for future engineers. Proceedings of 17th International Scientific Conference “Engineering for rural development”. Jelgava, Latvia, May 23-25, 2018, Latvia University of Agriculture. Faculty of Engineering. Vol. 17, pp. 1166-1172.
2. *Dubbini M., Pezzuolo A., De Giglio M., Gattelli M., Curzio L., Covi D., Yezekyan T., Marinello F.* Last generation instrument for agriculture multispectral data collection. CIGR Journal, vol. 19, 2017, pp. 158-163.
3. *Yata V.K., Tiwari B.C., Ahmad, I.* Nanoscience in food and agriculture: research, industries and patents. Environmental Chemistry Letters, vol. 16, 2018, pp. 79-84.
4. *Masek J., Novak P., Jasinskas A.* Evaluation of combine harvester operation costs in different working conditions. Proceedings of 16th International Scientific Conference “Engineering for rural development”. Jelgava, Latvia, May 24-26, 2017, Latvia University of Agriculture. Faculty of Engineering. Vol. 16, pp. 1180-1185.
5. *Rogovskii I., Grubrin O.* Accuracy of converting videoendoscopy combine harvester using generalized mathematical model. Scientific Herald of National University of Life and Environmental Science of Ukraine. Series: technique and energy of APK. Kyiv, Ukraine. vol. 298, 2018, pp. 149-156. doi: 10.31548/me.2018.04.149-156.
6. *Viba J., Lavendelis E.* Algorithm of synthesis of strongly non-linear mechanical systems. In Industrial Engineering – Innovation as Competitive Edge for SME, 22 April 2006. Tallinn, Estonia, pp. 95-98.
7. *Luo A.C.J., Guo Y.* Vibro-impact Dynamics. Berlin: Springer-Verlag, 2013. 213 p.
8. *Astashev V., Krupenin V.* Efficiency of vibration machines. Proceedings of 16th International Scientific Conference “Engineering for rural development”. Jelgava, Latvia, May 24-26, 2017, Latvia University of Agriculture. Faculty of Engineering. Vol. 16, pp. 108-113.
9. *Zagurskiy O., Ohiienko M., Rogach S., Pokusa T., Titova L., Rogovskii I.* Global supply chain in context of new model of economic growth. Conceptual bases and trends for development of social-economic processes. Monograph. Opole. Poland, 2018, pp. 64-74.
10. *Drga R., Janacova D., Charvatova H.* Simulation of the PIR detector active function. Proceedings of 20th International conference on Circuits, Systems, Communications and Computers (CSCC 2016), July 14-17, 2016, E D P Sciences, 17 Ave Du Hoggar Parc D Activites Coutaboeuf Bp 112, F-91944 Cedex A, France, vol. 76, UNSP 04036.
11. *Novotny J.* Technical and natural sciences teaching at engineering faculty of FPTM UJEP. Proceedings of 15th International Scientific Conference “Engineering for rural development”. Jelgava, Latvia, May 23-25, 2016, Latvia University of Agriculture. Faculty of Engineering. Vol. 15, pp. 16-20.
12. *Pinzi S., Cubero-Atienza A.J., Dorado M.P.* Vibro-acoustic analysis procedures for the evaluation of the sound insulation characteristics of agricultural machinery. Journal of Sound and Vibration, vol. 266 (3), 2016, pp. 407-441.

13. *Rogovskii I. L.* Systemic approach to justification of standards of restoration of agricultural machinery. Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research. Kyiv. Ukraine. 2019, Vol. 10, No 3, P. 181-187.

14. *Rogovskii I. L.* Consistency ensure the recovery of agricultural machinery according to degree of resource's costs. Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research. Kyiv. Ukraine. 2019, Vol. 10, No 4, P. 145-150.

15. *Роговський І. Л.* Алгоритмічність визначення періодичності відновлення працездатності сільськогосподарських машин за ступенем витрат їх ресурсу. Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research. Kyiv. Ukraine. 2020, Vol. 11, No 1, P. 155-162.

References

1. *Sergejeva N., Aboltins A., Strupule L., Aboltina B.* (2018). Mathematical knowledge in elementary school and for future engineers. Proceedings of 17th International Scientific Conference "Engineering for rural development". Jelgava, Latvia, May 23-25, 2018, Latvia University of Agriculture. Faculty of Engineering. Vol. 17, 1166-1172.

2. *Dubbini M., Pezzuolo A., De Giglio M., Gattelli M., Curzio L., Covi D., Yezekyan T., Marinello F.* (2017). Last generation instrument for agriculture multispectral data collection. CIGR Journal, vol. 19, 158-163.

3. *Yata V.K., Tiwari B.C., Ahmad, I.* (2018). Nanoscience in food and agriculture: research, industries and patents. Environmental Chemistry Letters, vol. 16, 79-84.

4. *Masek J., Novak P., Jasinskas A.* (2017). Evaluation of combine harvester operation costs in different working conditions. Proceedings of 16th International Scientific Conference "Engineering for rural development". Jelgava, Latvia, May 24-26, Latvia University of Agriculture. Faculty of Engineering. Vol. 16, 1180-1185.

5. *Rogovskii I., Grubrin O.* (2018). Accuracy of converting videoendoscopy combine harvester using generalized mathematical model. Scientific Herald of National University of Life and Environmental Science of Ukraine. Series: technique and energy of APK. Kyiv, Ukraine. vol. 298, 149-156. doi: 10.31548/me.2018.04.149-156.

6. *Viba J., Lavendelis E.* (2006). Algorithm of synthesis of strongly non-linear mechanical systems. In Industrial Engineering – Innovation as Competitive Edge for SME, 22 April 2006. Tallinn, Estonia, 95-98.

7. *Luo A.C.J., Guo Y.* (2013). Vibro-impact Dynamics. Berlin: Springer-Verlag. 213.

8. *Astashev V., Krupenin V.* (2017). Efficiency of vibration machines. Proceedings of 16th International Scientific Conference "Engineering for rural development". Jelgava, Latvia, May 24-26, Latvia University of Agriculture. Faculty of Engineering. Vol. 16, 108-113.

9. *Zagurskiy O., Ohiienko M., Rogach S., Pokusa T., Titova L., Rogovskii I.* (2018). Global supply chain in context of new model of economic growth. Conceptual bases and trends for development of social-economic processes. Monograph. Opole. Poland, 64-74.

10. *Drga R., Janacova D., Charvatova H.* (2016). Simulation of the PIR detector active function. Proceedings of 20th International conference on Circuits, Systems, Communications and Computers (CSCC 2016), July 14-17, 2016, E D P Sciences, 17 Ave Du Hoggar Parc D Activites Coutaboeuf Bp 112, F-91944 Cedex A, France, vol. 76, UNSP 04036.

11. *Novotny J.* (2016). Technical and natural sciences teaching at engineering faculty of FPTM UJEP. Proceedings of 15th International Scientific Conference "Engineering for rural development". Jelgava, Latvia, May 23-25, Latvia University of Agriculture. Faculty of Engineering. Vol. 15, 16-20.

12. *Pinzi S., Cubero-Atienza A.J., Dorado M.P.* (2016). Vibro-acoustic analysis procedures for the evaluation of the sound insulation characteristics of agricultural machinery. Journal of Sound and Vibration, vol. 266 (3), 407-441.

13. *Rogovskii I. L.* (2019). Systemic approach to justification of standards of restoration of agricultural machinery. Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research. Kyiv. Ukraine. Vol. 10, No 3, 181-187.

14. *Rogovskii I. L.* (2019). Consistency ensure the recovery of agricultural machinery according to degree of resource's costs. Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research. Kyiv. Ukraine. Vol. 10, No 4, 145-150.

15. *Rogovskii I. L.* (2020). Algorithmicly determine the frequency of recovery of agricultural machinery according to degree of resource's costs. Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research. Kyiv. Ukraine. Vol. 11, No 1, 155-162.

ОБОБЩЕННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИНДЕКСА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН ПРИ ПОТЕРИ ЕЕ РАБОСПОСОБНОСТИ

И. Л. Роговский

Аннотация. В статье проведен анализ поддержание существующих сельскохозяйственных машин в работоспособном состоянии, за которым следует отработать систему технического обслуживания с учетом условий реформирования аграрного сектора. Под техническим обслуживанием понимается комплекс работ по поддержанию работоспособности или исправности изделий при использовании по назначению путем регулировочных, знающих, заправочных и крепежных работ. Для оценки альтернативных вариантов целесообразно проводить морфологический анализ всей совокупности возможных решений исследуемой проблемы, представленных в виде морфологической матрицы, в которой представлены основные функции машины и варианты предметных форм их выполнения.

Теоретическими исследованиями предоставили ответ на два главных вопроса – как должна меняться система технического обслуживания в зависимости от уровня развития аграрного производства, а также –

какие параметры должна иметь система обслуживающего сервиса, чтобы выполнять соответствующие вмешательства с минимальными технологически необходимыми затратами ресурсов и капиталовложениями. Оценку уровня технического обслуживания сельскохозяйственных машин предусмотрено выполнять по совокупности организационно-технических факторов, формализованных через части и комплексные показатели, в два этапа. Первый – оценка через части показатели по каждому фактору отдельно. Второй – оценка комплексного показателя (по всем факторам в целом).

Ключевые слова: методология, коэффициент готовности, эффективность, сельскохозяйственная машина.

GENERALIZED MATHEMATICAL MODEL OF INDEX OF TECHNICAL CONDITION OF AGRICULTURAL MACHINE IN EVENT OF LOSS OF ITS WORKINGNESS

I. L. Rogovskii

Abstract. In the article the analysis of existing agricultural machines in a healthy state, followed by work on the maintenance system subject to the conditions of reforming of the agrarian sector. Under maintenance refers to the complex of works on maintenance of working capacity or serviceability of the products during use by adjusting, knowledgeable, filling and retaining work. For the assessment of the alternatives it is advisable to conduct morphological analysis of the entire set of possible solutions to the research problem presented in a morphological matrix, which presents the basic functions of the machine and options the subject of the forms of their implementation.

Theoretical research has provided the answer to two fundamental questions – how to change maintenance system depending on the level of development of agricultural production, and what parameters must have the system maintenance service to perform the appropriate intervention with the minimum technologically necessary costs of resources and investment. Assessment of the level of maintenance of agricultural machinery is provided to carry on the totality of organizational and technical factors, formalized through parts and complex indicators, in two phases. The first evaluation of using of the indicators for each factor separately. Second – assessment of a complex indicator (for all factors).

Key words: methodology, availability, efficiency, agricultural machine.

І. Л. Роговський ORCID 0000-0002-6957-1616.