

УДК 631.1.004

АНАЛІТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ ОЦІНЮВАННЯ КОЕФІЦІЄНТА ГОТОВНОСТІ САМОХІДНИХ ОБПРИСКУВАЧІВ ЗА РЕЖИМІВ ТЕХНІЧНОГО КОНТРОЛЮ

І. С. Любченко

Національний університет біоресурсів і природокористування України, Україна.

Стаття з спеціальності: 133 – галузеве машинобудування.

Кореспонденція автора: lub4enko.ira@gmail.com.

Історія статті: отримано – квітень 2021, акцептовано – серпень 2021, опубліковано – 30 вересня 2021 року.
Бібл. 28, рис. 9, табл. 1.

Анотація. Основним показником, що використовується для дослідження надійності є коефіцієнт готовності, під яким розуміється ймовірність того, що самохідний обприскувач опиниться у працездатному стані у довільний момент часу, крім запланованих періодів, протягом яких застосування самохідних обприскувачів за призначенням не передбачається. Виведення аналітичного виразу для коефіцієнта готовності K_g – досить трудомістка операція. Трудомісткість зростає з ускладненням графа, тобто при прагненні врахувати більше технічних станів, чинників, які впливають на процес технічного контролю самохідних обприскувачів. У зв'язку з цим розв'язання задачі такого плану доцільно проводити за допомогою імітаційної моделі. За допомогою інструменту моделювання Stateflow програмного пакету Matlab розроблено модель, яка дозволяє моделювати дискретно-подійні моделі. Модель самохідних обприскувачів серед Stateflow для оцінювання коефіцієнта готовності під час проведення технічного контролю за програмами. Результатами імітаційного моделювання є значення коефіцієнта готовності при різних програмах технічного контролю – $K_{g1}=0,88$ і $K_{g2}=0,90$, що дозволяє зробити висновки про вплив програми технічного контролю самохідних обприскувачів на значення коефіцієнта готовності. Ймовірності помилок при цьому варіювалися в межах від 0 до 1 і належали рівними: $\alpha_1 = \alpha_2$ та $\beta_1 = \beta_2$, що цілком обґрунтовано у випадках, коли технічний контроль відрізняється лише місцем вимірювання параметру технічного стану, а засоби вимірювання при цьому однакові. Авторкою встановлено, що коефіцієнт готовності чутливий до помилки другого роду в даному випадку. Шляхи подальших досліджень зустрічаються у дослідженні інших програм технічного контролю самохідних обприскувачів, у яких коефіцієнт готовності чутливий до ймовірності помилок першого роду.

Ключові слова: імітаційна модель, коефіцієнт готовності, самохідний обприскувач, технічний контроль.

Постановка проблеми

Правильне оцінювання показників надійності одна із основних чинників підвищення ефективності експлуатації складних технічних систем [1], якими є самохідні обприскувачі [2]. Основним показником, що використовується для дослідження надійності є коефіцієнт готовності [3], під яким розуміється ймовірність того, що самохідний обприскувач опиниться у працездатному стані у довільний момент часу [4], крім запланованих періодів [5], протягом яких застосування самохідних обприскувачів за призначенням не передбачається [6]. В даний час для розрахунку коефіцієнта готовності використовуються показники, що характеризують безвідмовність самохідних обприскувачів (інтенсивність відмов, середній час безвідмовної роботи) [7] та показники, що характеризують систему відновлення працездатності самохідних обприскувачів (інтенсивність та середній час відновлення) [8].

Середній час відновлення включає час діагностування і час виконання робіт з відновлення працездатності самохідних обприскувачів (наприклад, час заміни несправного механізму, час перемикавання на резервний комплект) [9]. При обчисленні коефіцієнта готовності не враховуються помилки технічного контролю [10], які можуть суттєво вплинути на коефіцієнт готовності самохідних обприскувачів [11]. Наприклад, при неправильному визначенні несправного механізму виконується комплекс робіт із заміни несправного механізму на справний [12], при цьому самохідний обприскувач так і залишиться несправною [13].

Аналіз останніх досліджень

У роботах [14, 15] розглянуто вплив помилок технічного контролю на коефіцієнт готовності із застосуванням марківської моделі. У розвиток цього підходу в цій статті пропонується нова імітаційна модель, що дозволяє оцінити вплив на коефіцієнт готовності самохідних обприскувачів наступних факторів:

- програми технічного контролю [16];
- інтервалів часу між циклами виконання програми технічного контролю [17];
- характеристик перевірок, що входять до програми технічного контролю (тривалості перевірок, помилок першого і другого роду) [18].

Сучасні самохідні обприскувачі, як правило, є системами управління і включають три основні компоненти: об'єкт управління [19], керуючий орган [20] і систему зворотного зв'язку [21].

Об'єкт управління є технічною системою, яка може бути у працездатному чи одному з непрацездатних станів [22]. У межах дослідження не розглядаються самоусуваючі відмови, отже, об'єкт управління може перейти з працездатного в один із непрацездатних станів із заданою інтенсивністю [23].

Керуючий орган призначений для формування та видачі керуючих впливів на об'єкт управління відповідно до цільового призначення самохідних обприскувачів [24]. У завдання об'єкту управління також належить відновлення працездатності об'єкту управління у разі виникнення відмов [25].

Система зворотний зв'язок у частині, що стосується забезпечення надійності самохідних обприскувачів, виконує функції контролю та діагностування об'єкту управління [26]. У її завдання входить визначення факту відмови об'єкту управління (контроль) та місця відмови (діагностування) [27]. Процес технічного контролю характеризується послідовністю перевірок (програмою технічного контролю) та параметрами перевірок: тривалістю, помилками першого та другого роду [28]. Проблемі побудови оптимальних за різними показниками (достовірності, тривалості, інформативності) програм технічного контролю присвячено безліч наукових праць [4-11], тому в рамках цієї статті програма технічного контролю належить побудованій по одному з відомих алгоритмів.

Мета досліджень

Мета досліджень – виконати опис аналітичних положень оцінювання коефіцієнта готовності самохідних обприскувачів за режимів технічного контролю.

Результати досліджень

Слід зазначити, що математичні моделі всіх компонентів самохідних обприскувачів в озвученій постановці досить добре вивчені. У межах дослідження поставлено завдання оцінювання коефіцієнта готовності самохідних обприскувачів за наявності системи технічного контролю, що функціонує за заданою програмою. Таким чином, можна здійснити математичну постановку задачі.

Дано. Модель об'єкта технічного контролю M_{otk} :

$$M_{otk} = \langle S, L, \hat{L}, T, A, B, L^o, \Lambda, C, T_{tk}, \chi \rangle,$$

де $S = \{S_i | i = \overline{0, n}\}$ – множина технічних станів самохідних обприскувачів S_0 – працездатний стан, $S_1, \dots, S_n$ – непрацездатний стан, який обумовлений

єдиничними відмовами функціонування механізмів самохідних обприскувачів з глибиною до яких здійснюється технічний контроль параметрів технічного стану;

$L = \{l_j | j = \overline{1, m}\}$ – множина операцій технічного контролю параметрів технічного стану самохідних обприскувачів;

$\hat{L} = \{\hat{l}_{ij} | i = \overline{0, n}; j = \overline{1, m}\}$ – множина модельних вихідних операцій технічного контролю параметрів технічного стану самохідних обприскувачів «0» – «не норма», «1» – «норма»;

$T = \{t_o | j = \overline{1, m}\}$ – множина тривалості операцій технічного контролю параметрів технічного стану самохідних обприскувачів;

$A = \{a_o | j = \overline{1, m}\}$ – множина ймовірності помилок першого роду операцій технічного контролю параметрів технічного стану самохідних обприскувачів;

$B = \{b_o | j = \overline{1, m}\}$ – множина ймовірності помилок другого роду операцій технічного контролю параметрів технічного стану самохідних обприскувачів;

$L^o = \{l_i^o | i = \overline{0, n}\}$ – множина апіорних ймовірностей працездатних видів технічного стану в початковий момент часу $\tau = 0$;

$\Lambda = \{\lambda_i | i = \overline{0, n}\}$ – множина інтенсивностей переходів із стану S_0 в стан S_i (інтенсивності відмов);

$C = \{c_i | i = \overline{0, n}\}$ – множина інтенсивностей переходів із стану S_i в стан S_0 (інтенсивності відновлень);

T_{tk} – інтервал часу між циклами технічного контролю параметрів технічного стану самохідних обприскувачів (періодичність);

$\chi: S \cdot L \rightarrow \hat{L}$ – відображення, яке встановлює у відповідність технічному контролю l_j його завершення, якщо самохідний обприскувач перебуває в стані S_i

Дано. Модель програми технічного контролю M_{ptk} :

$$M_{ptk} = \langle M_{otk}, \Omega, G, \Psi \rangle,$$

де Ω – множина інформаційних станів програми технічного контролю, яка є підмножиною контрольованих технічних станів, в одному з яких може знаходитись самохідний обприскувач в поточній фазі процесу технічного контролю:

$$\Omega = \{\omega_o | \omega_o \subseteq S\}; o = \overline{1, O}, O = \sum_{k=1}^{m+1} O_{n+1}^k = 2^{n+1} - 1$$

G – матриця переходів між інформаційних станів програми технічного контролю:

$$G = \{\langle \omega_o, \omega_k \rangle | \varphi(\omega_o, \omega_k)\}$$

$\varphi(\omega_o, \omega_k) = 1$, якщо процес технічного контролю може перейти із ω_o в ω_k , $\varphi(\omega_o, \omega_k) = 0$ в протилежному випадку:

$$\Psi: G \rightarrow L \cdot \hat{L}$$

Необхідно оцінити вплив програми технічного контролю на коефіцієнт готовності самохідного обприскувача:

$$K_g = P(S).$$

Модель процесу відмов і відновлення самохідних обприскувачів, як правило, представляється в формі

марківського процесу, граф стану якого представлено на рис. 1а. Дана модель дозволяє визначити коефіцієнт готовності самохідного обприскувача, але не враховує характеристики процесу технічного контролю. Для їх обліку в процесі відновлення введено додатковий стан S_d , яким позначається режим технічного контролю (рис. 1б). Інтенсивність переходів в стан S_d зворотно пропорційна інтервалу між циклами технічного контролю T_{tk} , тобто періодичності. Із стану S_d процес технічного контролю може перейти в стан S_0 при коректному результаті технічного контролю параметра технічного стану і зворотно в поточний технічний стан

$\{S_i | i = \overline{1, n}\}$ у випадку помилки технічного контролю. Очевидно, що розглянутий процес не є марківський, так як перехід із стану S_d в стану S_i залежить від попереднього стану.

Ця модель дозволяє враховувати загальну достовірність технічного контролю, проте за її допомогою неможливо оцінити вплив характеристик окремої перевірки на коефіцієнт готовності. Для цього замінимо кожен стан S_d/S_i графом, що задає програму технічного контролю (рис. 2), в якому визначимо ймовірності помилок технічного контролю за наступним правилом (1).

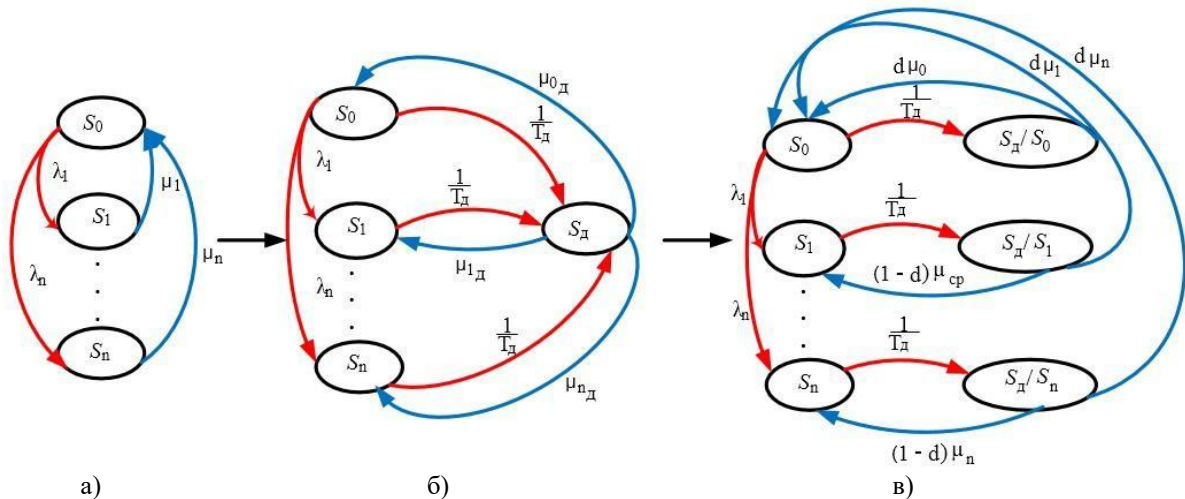


Рис. 1. Модель процесу відмов та відновлення самохідних обприскувачів.

Fig. 1. Model of the process of failure and recovery of self-propelled sprayers.

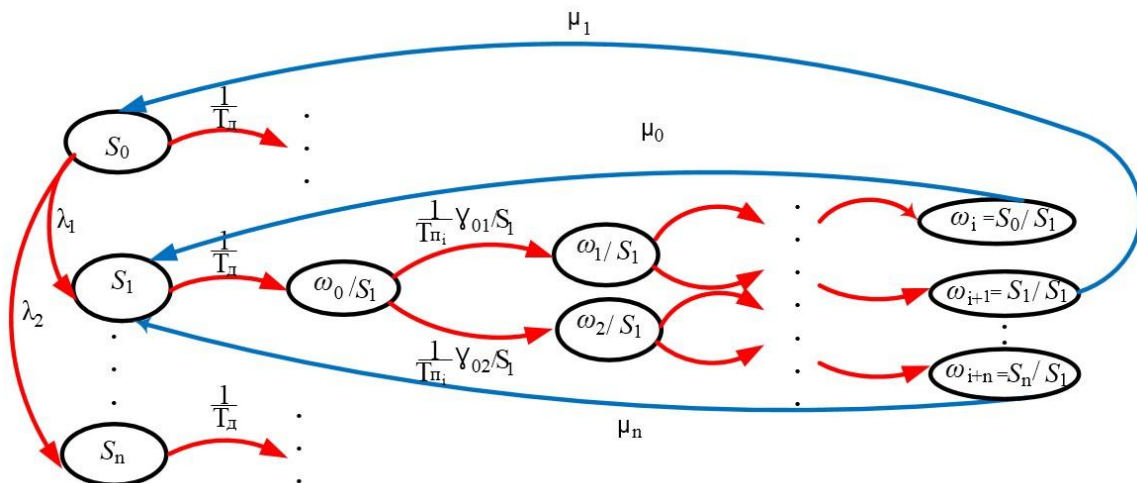


Рис. 2. Фрагмент графа, що задає програму технічного контролю самохідних обприскувачів.

Fig. 2. Fragment of the graph specifying the program of technical control of self-propelled sprayers.

$$\frac{\gamma_{ok}}{S_i} = \begin{cases} 1 - a_j, \text{ якщо } [\Psi(\langle \omega_o, \omega_k \rangle) = \langle \pi_j, 1 \rangle] \wedge (\chi\{S_i, \pi_j\} = 1) \\ a_j, \text{ якщо } [\Psi(\langle \omega_o, \omega_k \rangle) = \langle \pi_j, 0 \rangle] \wedge (\chi\{S_i, \pi_j\} = 1) \\ 1 - \beta_j, \text{ якщо } [\Psi(\langle \omega_o, \omega_k \rangle) = \langle \pi_j, 0 \rangle] \wedge (\chi\{S_i, \pi_j\} = 0) \\ \beta_j, \text{ якщо } [\Psi(\langle \omega_o, \omega_k \rangle) = \langle \pi_j, 1 \rangle] \wedge (\chi\{S_i, \pi_j\} = 0) \end{cases} \quad (1)$$

Імітаційна модель визначення коефіцієнта готовності самохідних обприскувачів. Нехай об'єкт технічного контролю складається із двох блоків (рис. 3).

Імітаційну модель коефіцієнта готовності самохідних обприскувачів можна у формі таблиці 1. За вихідними даними моделі побудуємо програму технічного контролю самохідних обприскувачів:

Для виведення аналітичної залежності коефіцієнта готовності від показників технічного контролю самохідних обприскувачів, реалізуємо програму технічного контролю самохідних обприскувачів (рис. 4а) як марківської моделі, представленій рис. 5.

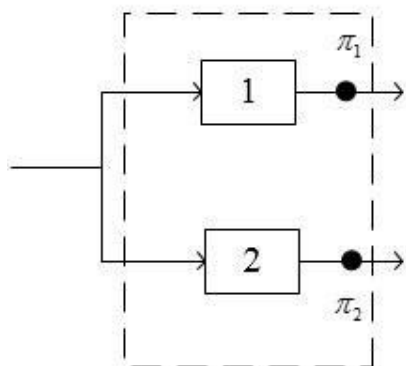


Рис. 3. Об'єкт технічного контролю.
Fig. 3. Object of technical control.

Таблиця 1. Загальний вид імітаційної моделі.
Table 1. General view of the simulation model.

S_i	π_1	π_2	L^o	Λ	C
S_0	1	1	L_0^o		
S_1	0	0	L_1^o	λ_1	μ_1
S_2	0	1	L_2^o	λ_2	μ_2
A	a_1	a_2			
B	β_1	β_2			

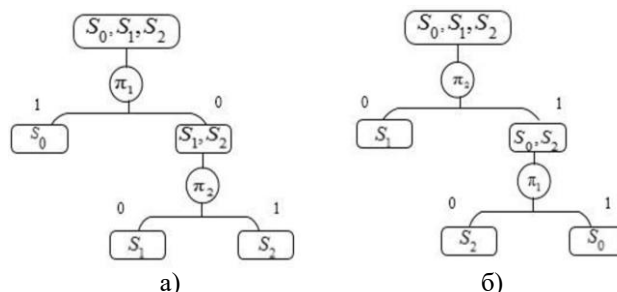


Рис. 4. Програми технічного контролю з різною послідовністю операцій.

Fig. 4. Technical control programs with different sequence of operations.

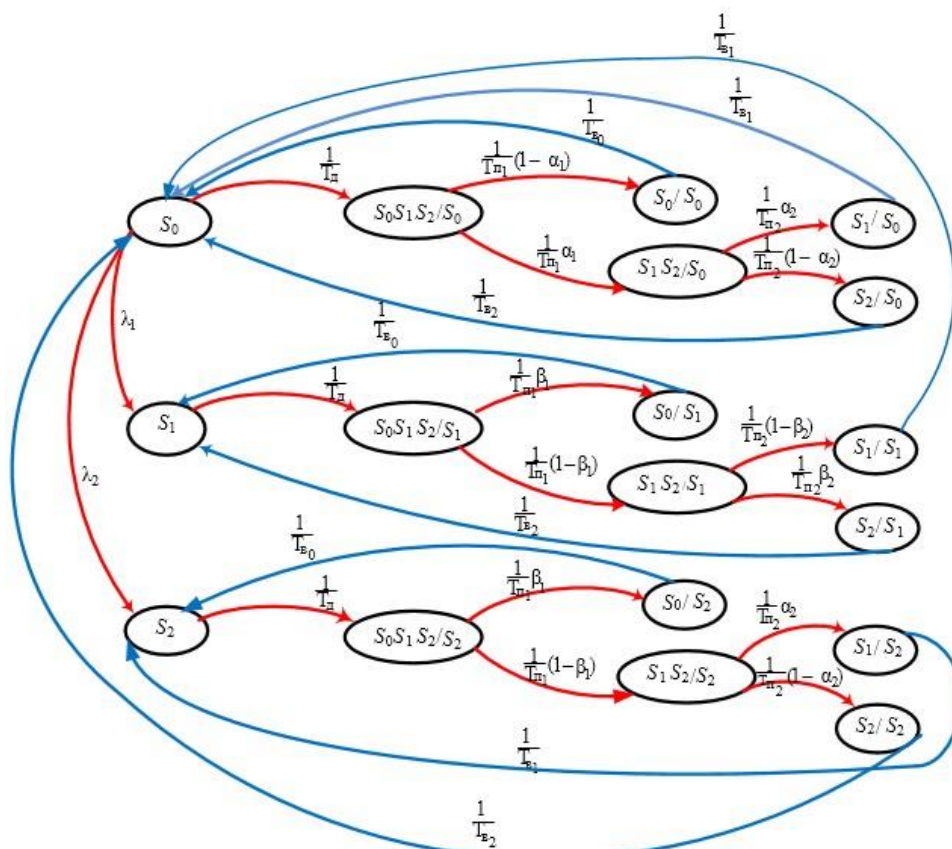


Рис. 5. Модель марківського процесу для програми технічного контролю самохідних обприскувачів.
Fig. 5. Markov process model for the program of technical control of self-propelled sprayers.

На рис. 5 прийняті наступні позначення:

$S_0S_1S_2/S_0$ – режим технічного контролю самохідних обприскувачів для стану S_0 ;
 $S_0S_1S_2/S_1$ – режим технічного контролю самохідних обприскувачів для стану S_1 ;
 $S_0S_1S_2/S_2$ – режим технічного контролю самохідних обприскувачів для стану S_2 ;

S_0/S_0 – фіксація працездатного стану самохідних обприскувачів для стану S_0 , при якому обприскувач дійсно працездатний;

S_1S_2/S_0 – фіксація непрацездатного стану самохідних обприскувачів для стану S_1S_2 , при якому обприскувач ще знаходиться в працездатному стані;

S_1/S_0 – фіксація непрацездатного стану самохідних обприскувачів для стану S_1 , при якому обприскувач ще знаходиться в працездатному стані;

S_2/S_0 – фіксація непрацездатного стану самохідних обприскувачів для стану S_2 , при якому обприскувач ще знаходиться в працездатному стані;

$T_{в0}$ – середній час відновлення для тих станів, в яких зафіксовано стан S_0 ;

$T_{в1}$ – середній час відновлення для тих станів, в яких зафіксовано стан S_1 ;

$T_{в2}$ – середній час відновлення для тих станів, в яких зафіксовано стан S_2 ;

τ_1 – тривалість операцій технічного контролю π_1 ;

τ_2 – тривалість операцій технічного контролю π_2 ;

T_d – інтервал часу між циклами технічного контролю;

a_1, a_2 – ймовірність похибок першого роду для перевірок π_1 і π_2 ;

β_1, β_2 – ймовірність похибок другого роду для перевірок π_1 і π_2 .

Модель, що представлена рис. 5, проти раніше відомих має такі переваги:

- можливість розгляду розширеного складу технічних станів;

- можливість урахування помилок α та β для всіх перевірок.

Виведення аналітичного виразу для коефіцієнта готовності K_g – досить трудомістка операція. Трудомісткість зростає з ускладненням графа, тобто при прагненні врахувати більше технічних станів, чинників, які впливають процес технічного контролю самохідних обприскувачів. У зв'язку з цим розв'язання задачі такого плану доцільно проводити за допомогою імітаційної моделі.

Імітаційна модель оцінювання коефіцієнта готовності складної технічної системи для програми технічного контролю самохідних обприскувачів з урахуванням показників технічного контролю.

За допомогою інструменту моделювання Stateflow програмного пакету Matlab розроблено модель, яка дозволяє моделювати дискретно-подійні моделі. Модель самохідних обприскувачів серед Stateflow для оцінювання коефіцієнта готовності під час проведення технічного контролю за програмою №1 (рис. 4а) представлено рис. 6, та її докладний опис – рис. 7.

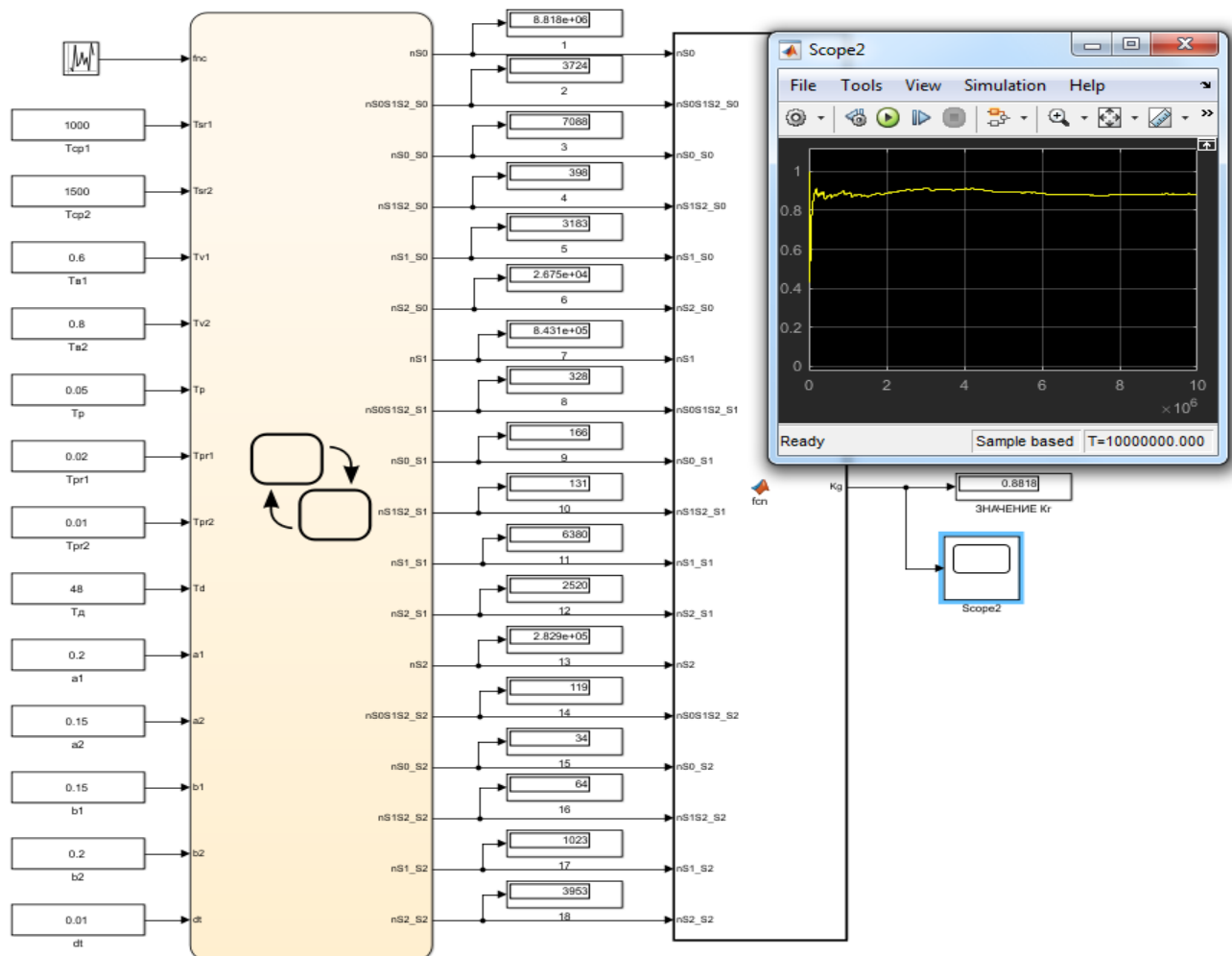


Рис. 6. Модель самохідних обприскувачів серед Stateflow для оцінювання коефіцієнта готовності під час проведення технічного контролю за програмою №1 (рис. 4а).

Fig. 6. Model of self-propelled sprayers among Stateflow to assess the coefficient of readiness during the technical control of the program №1 (Fig. 4a).

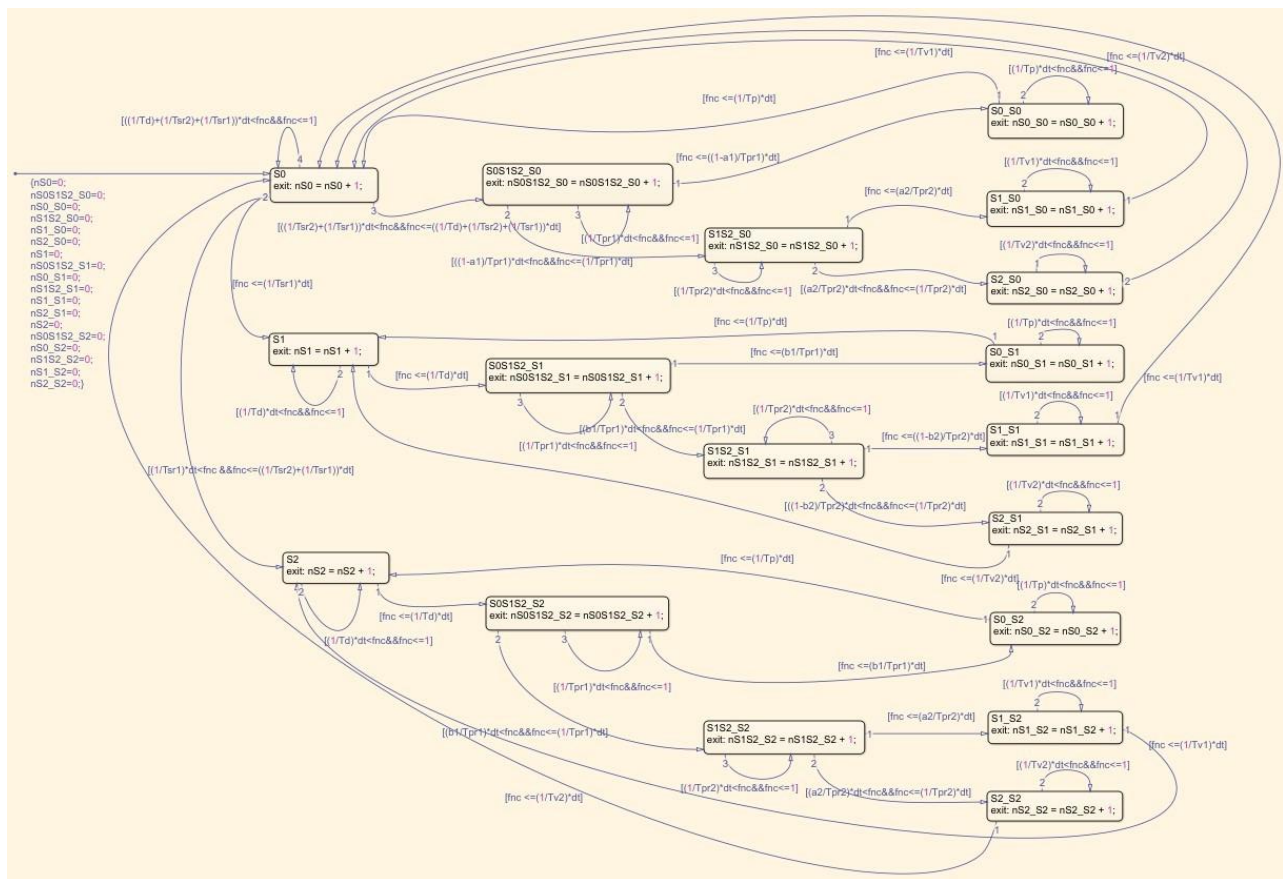


Рис. 7. Модель самохідних обприскувачів серед Stateflow для оцінювання коефіцієнта готовності під час проведення технічного контролю за програмою №2 (рис. 4б).

Fig. 7. Model of self-propelled sprayers among Stateflow to assess the coefficient of readiness during the technical control of the program №2 (Fig. 4b).

Вихідними даними для імітаційного модулювання були: $T_{cp1}=1000$ год, $T_{cp2}=1500$ год, $T_{b1}=0,6$ год, $T_{b2}=0,8$ год, $T_n=0,05$ год, $\tau_1=0,02$ год, $\tau_2=0,01$ год, $T_d=48$ год, $\alpha_1=0,2$, $\alpha_2=0,15$, $\beta_1=0,15$, $\beta_2=0,2$, де T_{cp1} , T_{cp2} – середня тривалість безвідмовної роботи самохідного обприскувача першого і другого його механізму.

Для програми технічного контролю самохідних обприскувачів, зображеної на рис. 4б, модель самохідних обприскувачів будується аналогічно, відмінністю буде інший набір станів, оскільки різний порядок операцій технічного контролю.

Результатами імітаційного моделювання є значення коефіцієнта готовності при різних програмах технічного контролю – $K_{g1}=0,88$ і $K_{g2}=0,90$, що дозволяє зробити висновки про вплив програми технічного контролю самохідних обприскувачів на значення коефіцієнта готовності.

На рис. 8 представлена залежність коефіцієнта готовності від періодичності технічного контролю за різних програм технічного контролю самохідних обприскувачів.

На рис. 9 представлені графіки залежності коефіцієнта готовності від ймовірностей помилок першого та другого роду. Ймовірності помилок при цьому варіювалися в межах від 0 до 1 і належали рівними: $\alpha_1 = \alpha_2$ та $\beta_1 = \beta_2$, що цілком обґрунтовано у випадках, коли технічний контроль відрізняється лише місцем вимірювання параметру технічного стану, а засоби вимірювання при цьому однакові.

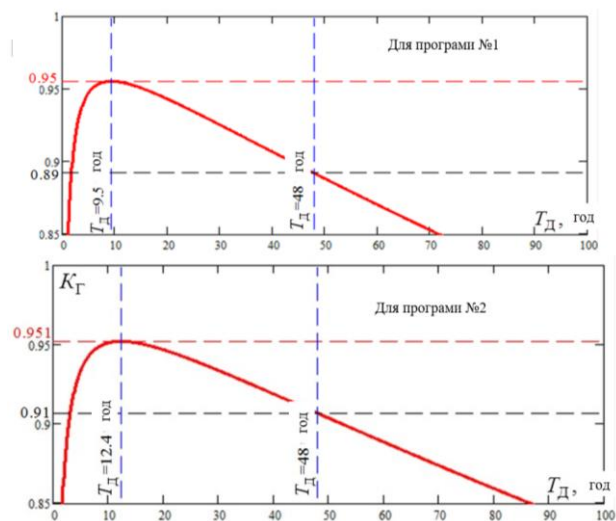


Рис. 8. Залежності коефіцієнта готовності від періодичності технічного контролю самохідних обприскувачів за різних програм.

Fig. 8. Dependencies of the readiness factor on the periodicity of technical control of self-propelled sprayers for different programs.

З рис. 9 видно, що коефіцієнт готовності чутливий до помилки другого роду в даному випадку. Шляхи подальших досліджень зустрічаються у дослідженні інших програм технічного контролю самохідних обприскувачів, у яких коефіцієнт готовності чутливий

до ймовірності помилок першого роду.

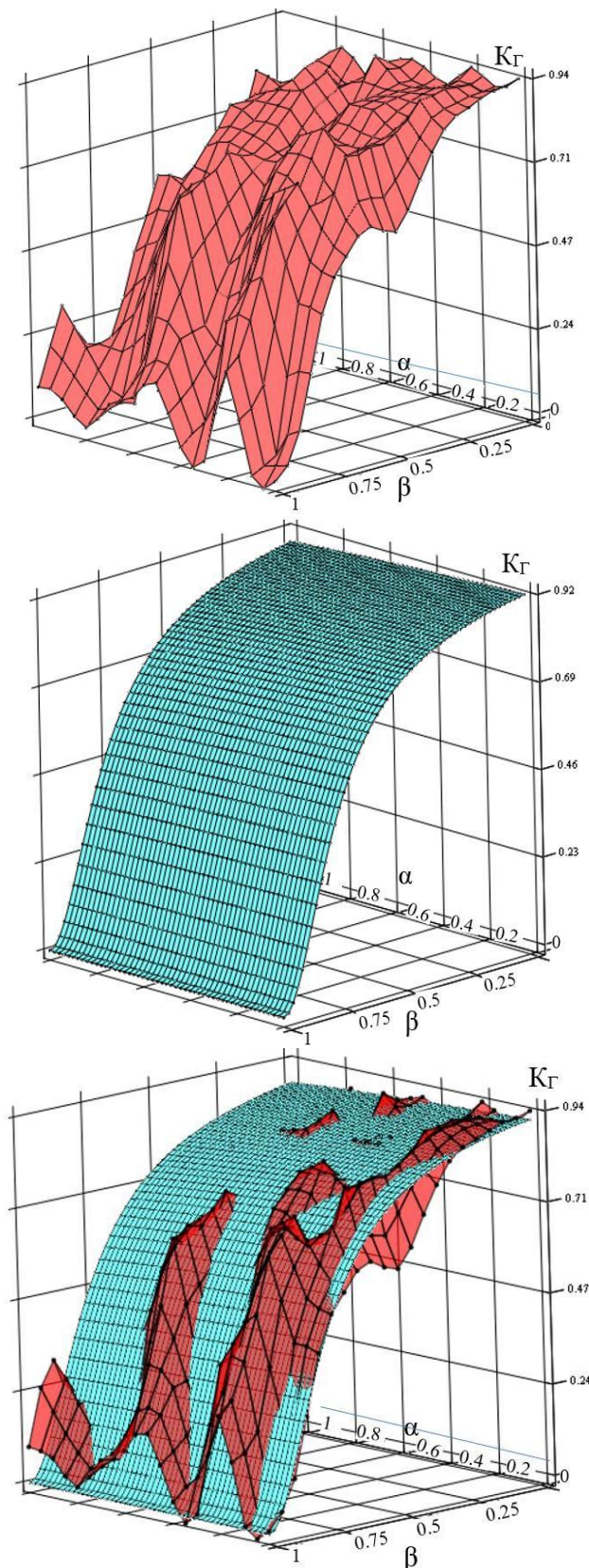


Рис. 9. Залежності коефіцієнта готовності від ймовірностей помилок технічного контролю, отримані в результаті імітаційного моделювання та аналітичним способом.

Fig. 9. Dependences of the readiness factor on the probabilities of technical control errors obtained as a result of simulation and analytical methods.

Отримані результати дозволяють зробити висновок про необхідність обліку впливу характеристик і показників технічного контролю самохідних обприскувачів на коефіцієнт готовності самохідних обприскувачів. Розроблені моделі можуть бути використані для визначення орієнтовних значень періодичності технічного контролю самохідних обприскувачів, а також для формування послідовності та складу перевірок з метою підвищення коефіцієнта готовності самохідних обприскувачів.

Подальші дослідження можуть бути пов'язані з розширенням складу технічних станів та перевірок ознак втрати працездатності самохідних обприскувачів.

Висновки

1. Виведення аналітичного виразу для коефіцієнта готовності самохідних обприскувачів K_g – досить трудомістка операція. Трудомісткість зростає з ускладненням графа, тобто при прагненні врахувати більше технічних станів, чинників, які впливають процес технічного контролю самохідних обприскувачів. У зв'язку з цим розв'язання задачі такого плану доцільно проводити за допомогою імітаційної моделі. За допомогою інструменту моделювання Stateflow програмного пакету Matlab розроблено модель, яка дозволяє моделювати дискретно-подійні моделі.

2. Результатами імітаційного моделювання є значення коефіцієнта готовності при різних програмах технічного контролю – $K_{g1}=0,88$ і $K_{g2}=0,90$, що дозволяє зробити висновки про вплив програми технічного контролю самохідних обприскувачів на значення коефіцієнта готовності.

3. Імовірності помилок варіювалися в межах від 0 до 1 і належали рівним: $a_1 = a_2$ та $\beta_1 = \beta_2$, що цілком обґрунтовано у випадках, коли технічний контроль самохідних обприскувачів відрізняється лише місцем вимірювання параметру технічного стану, а засоби вимірювання при цьому однакові.

Список літератури

1. Savickas D. Self-propelled sprayers fuel consumption and air pollution reduction. Water, Air & Soil Pollution. 2020. Vol. 231. P. 95. <https://doi.org/10.1007/s11270-020-4466-5>.
2. Meng A. Modeling and experiments on Galfenol energy self-propelled sprayers. Acta Mechanica. Sinica 2020. <https://doi.org/10.1007/s10409-020-00943-6>.
3. Li P. Design and experimental study of broadband hybrid energy self-propelled sprayers with frequency-up conversion and nonlinear magnetic force. Micro- and Nanosystems Information Storage and Processing Systems. 2020. Issue 5. <https://doi.org/10.1007/s00542-019-04716-5>.
4. Beneš L., Novák P., Mašek J., Petrášek S. John Deere self-propelled sprayers fuel consumption and operation costs. Engineering for Rural Development. 2015. Vol. 15. P. 13-17.

5. Craessaerts G., De Baerdemaeker J., Saeys W. Fault diagnostic systems for agricultural machinery. *Biosystems Engineering*. 2020. Vol. 106(1). P. 26-36.
6. Toro A., Gunnarsson C., Lundin G., Jonsson N. Cereal harvesting – strategies and costs under variable weather conditions. *Biosystems Engineering*. 2021. Vol. 111(4). P. 429-439.
7. Findura P., Turan J., Jobbágy J., Angelović M., Ponjican O. Evaluation of work quality of the green peas self-propelled sprayers. *Research in agricultural engineering*. 2019. Vol. 59. P. 56-60.
8. Hanna H. M., Jarboe D. H. Effects of full, abbreviated, and no clean-outs on commingled grain during self-propelled sprayers. *Applied Engineering in Agriculture*. 2021. Vol. 27(5). P. 687-695.
9. Korenko M., Bujna M., Földešiová D., Dostál P., Kyselica P. Risk analysis at work in manufacturing organization. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*. 2015. Vol. 63. P. 1493-1497.
10. Lee D. H., Kim Y. J., Choi C. H., Chung S. O., Nam Y. S., So J. H. Evaluation of operator visibility in three different cabins type Far-East self-propelled sprayers. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2016. Vol. 9(4). P. 33-44.
11. Prístavka M., Bujna M. Use of satatical methods in quality control. *Acta Technologica Agriculturae*. SUA in Nitra. 2013. Vol. 13. P. 33-36.
12. Prístavka M., Bujna M., Korenko M. Reliability monitoring of self-propelled sprayers in operating conditions. *Journal of Central European Agriculture*. 2013. Vol. 14. P. 1436-1443.
13. Singh M., Verma A., Sharma A. Precision in grain yield monitoring technologies: a review. *AMA-Agricultural Mechanization in Asia Africa and Latin America*. 2012. Vol. 43(4). P. 50-59.
14. Žitňák M., Kollárová K., Macák M., Prístavková M., Bošanský M. Assessment of risks in the field of safety, quality and environment in post-harvest line. *Research in Agricultural Engineering*. 2015. Vol. 61. P. 26-36.
15. Žitňák M., Macák M., Korenko M. Assessment of risks in implementing automated satellite navigation systems. *Research in Agricultural Engineering*. 2014. Vol. 60. P. 16-24.
16. Viba J., Lavendelis E. Algorithm of synthesis of strongly non-linear mechanical systems. *Industrial Engineering – Innovation as Competitive Edge for SME*, 22 April 2006. Tallinn, Estonia. P. 95-98.
17. Luo A.C.J., Guo Y. *Vibro-impact Dynamics*. Berlin: Springer-Verlag, 2013. 213 p.
18. Astashev V., Krupenin V. Efficiency of vibration machines. *Engineering for Rural Development*. 2017. Vol. 16. P. 108-113.
19. Zagurskiy O., Ohienko 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. P. 64-74.
20. Тітова Л. Л., Нучай І. М. Методологічні положення технічного рівня використання комплексу сільськогосподарських машин. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*. Kyiv. Ukraine. 2020. Vol. 11. № 3. P. 151-162. <http://dx.doi.org/10.31548/machenergy2020.03.151>.
21. 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. <http://dx.doi.org/10.31548/machenergy2019.03.181>.
22. 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. <http://dx.doi.org/10.31548/machenergy2019.04.145>.
23. 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. <http://dx.doi.org/10.31548/machenergy2020.01.155>.
24. Rogovskii I., Titova L., Novitskii A., Rebenko V. Research of vibroacoustic diagnostics of fuel system of engines of combine harvesters. *Engineering for Rural Development*. 2019. Vol. 18. P. 291-298.
25. Rogovskii Ivan. Graph-modeling when the response and recovery of agricultural machinery. *MOTROL*. Lublin. 2016. Vol. 18. No 3. P. 155-164.
26. Роговський І. Л. Модель стохастичного процесу відновлення працездатності сільськогосподарської машини в безінерційних системах із запізненням. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*. Kyiv. Ukraine. 2020. Vol. 11. No 3. P. 143-150. <http://dx.doi.org/10.31548/machenergy2020.03.143>.
27. Роговський І. Л. Моделі формування альтернатив інженерного менеджменту в методах підвищення виробництва зерна в сільськогосподарських підприємствах. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*. Kyiv. Ukraine. 2021. Vol. 12. No 1. P. 137-146. <http://dx.doi.org/10.31548/machenergy2021.01.137>.
28. Rogovskii I. L. Resource of removal expenses for strong agricultural period of volume of operations. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*. Kyiv. Ukraine. 2021. Vol. 12. No 2. P. 123-131. <http://dx.doi.org/10.31548/machenergy2021.02.123>.

References

1. Savickas D. (2020). Self-propelled sprayers fuel consumption and air pollution reduction. *Water, Air & Soil Pollution*. 231. 95. <https://doi.org/10.1007/s11270-020-4466-5>.
2. Meng A. (2020). Modeling and experiments on Galfenol energy self-propelled sprayers. *Acta Mechanica Sinica*. <https://doi.org/10.1007/s10409-020-00943-6>.
3. Li P. (2020). Design and experimental study of broadband hybrid energy self-propelled sprayers with frequency-up conversion and nonlinear magnetic force. *Micro- and Nanosystems Information Storage and Processing Systems*. 5. <https://doi.org/10.1007/s00542-019-04716-5>.

4. Beneš L., Novák P., Mašek J., Petrášek S. (2015). John Deere self-propelled sprayers fuel consumption and operation costs. *Engineering for Rural Development*. 15. 13-17.
5. Craessaerts G., De Baerdemaeker J., Saeys W. (2020). Fault diagnostic systems for agricultural machinery. *Biosystems Engineering*. 106(1). 26-36.
6. Toro A., Gunnarsson C., Lundin G., Jonsson N. (2021). Cereal harvesting – strategies and costs under variable weather conditions. *Biosystems Engineering*. 111(4). 429-439.
7. Findura P., Turan J., Jobbágy J., Angelovič M., Ponjican O. (2019). Evaluation of work quality of the green peas self-propelled sprayers. *Research in agricultural engineering*. 59. 56-60.
8. Hanna H. M., Jarboe D. H. (2021). Effects of full, abbreviated, and no clean-outs on commingled grain during self-propelled sprayers. *Applied Engineering in Agriculture*. 27(5). 687-695.
9. Korenko M., Bujna M., Földesiová D., Dostál P., Kyselica P. (2015). Risk analysis at work in manufacturing organization. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*. 63. 1493-1497.
10. Lee D. H., Kim Y. J., Choi C. H., Chung S. O., Nam Y. S., So J. H. (2016). Evaluation of operator visibility in three different cabins type Far-East self-propelled sprayers. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 9(4). 33-44.
11. Prístavka M., Bujna M. (2013). Use of statistical methods in quality control. *Acta Technologica Agriculturae*. SUA in Nitra. 13. 33-36.
12. Prístavka M., Bujna M., Korenko M. (2013). Reliability monitoring of self-propelled sprayers in operating conditions. *Journal of Central European Agriculture*. 14. 1436-1443.
13. Singh M., Verma A., Sharma A. (2012). Precision in grain yield monitoring technologies: a review. *AMA-Agricultural Mechanization in Asia Africa and Latin America*. 43(4). 50-59.
14. Žitňák M., Kollárová K., Macák M., Prístavková M., Bošanský M. (2015). Assessment of risks in the field of safety, quality and environment in post-harvest line. *Research in Agricultural Engineering*. 61. 26-36.
15. Žitňák M., Macák M., Korenko M. (2014). Assessment of risks in implementing automated satellite navigation systems. *Research in Agricultural Engineering*. 60. 16-24.
16. Viba J., Lavendelis E. (2006). Algorithm of synthesis of strongly non-linear mechanical systems. *Industrial Engineering – Innovation as Competitive Edge for SME*, 22 April 2006. Tallinn, Estonia. 95-98.
17. Luo A.C.J., Guo Y. (2013). *Vibro-impact Dynamics*. Berlin: Springer-Verlag. 213.
18. Astashev V., Krupenin V. (2017). Efficiency of vibration machines. *Engineering for Rural Development*. 16. 108-113.
19. Zagurskiy O., Ohienko 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.
20. Titova L. L., Nichay I. M. (2020). Methodological provisions of technical level of use of complex of agricultural machines. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*. Kyiv. Ukraine. 11(3). 151-162. <http://dx.doi.org/10.31548/machenergy2020.03.151>.
21. Rogovskii I. L. (2019). Systemic approach to justification of standards of restoration of agricultural machinery. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*. Kyiv. Ukraine. 10(3). 181-187. <http://dx.doi.org/10.31548/machenergy2019.03.181>.
22. 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. 10(4). 145-150. <http://dx.doi.org/10.31548/machenergy2019.04.145>.
23. Rogovskii I. L. (2020). Algorithmically determine the frequency of recovery of agricultural machinery according to degree of resource's costs. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*. Kyiv. Ukraine. 11(1). 155-162. <http://dx.doi.org/10.31548/machenergy2020.01.155>.
24. Rogovskii I., Titova L., Novitskii A., Rebenko V. (2019). Research of vibroacoustic diagnostics of fuel system of engines of combine harvesters. *Engineering for Rural Development*. 18. 291-298.
25. Rogovskii Ivan. (2016). Graph-modeling when the response and recovery of agricultural machinery. *MOTROL*. Lublin. 18(3). 155-164.
26. Rogovskii I. L. (2020). Model of stochastic process of restoration of working capacity of agricultural machine in inertial systems with delay. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*. Kyiv. Ukraine. 11(3). 143-150. <http://dx.doi.org/10.31548/machenergy2020.03.143>.
27. Rogovskii I. L. (2021). Models of formation of engineering management alternatives in methods of increasing grain production in agricultural enterprises. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*. Kyiv. Ukraine. 12(1). 137-146. <http://dx.doi.org/10.31548/machenergy2021.01.137>.
28. Rogovskii I. L. (2021). Resource of removal expenses for strong agricultural period of volume of operations. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*. Kyiv. Ukraine. 12(2). 123-131. <http://dx.doi.org/10.31548/machenergy2021.02.123>.

АНАЛІТИЧЕСЬКІ ПОЛОЖЕННЯ ОЦІНЮВАННЯ КОЕФІЦІЄНТА ГОТОВНОСТІ САМОХІДНИХ ОПРИСКИВАТЕЛІВ ПО РЕЖИМАМ ТЕХНІЧЕСЬКОГО КОНТРОЛЮ

И. С. Любченко

Аннотация. Основным показателем, используемым для исследования надежности, является коэффициент готовности, под которым понимается вероятность того, что самоходный опрыскиватель окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме запланированных периодов, в течение которых применение самоходных опрыскивателей по назначению не предусматривается. Вывод аналитического выражения для коэффициента готовности K_g – довольно трудоемкая операция.

Трудоемкость растет с усложнением графа, то есть при стремлении учесть больше технических состояний, факторов, влияющих на процесс технического контроля самоходных опрыскивателей. В этой связи решение задачи такого плана целесообразно проводить с помощью имитационной модели. С помощью инструмента моделирования Stateflow программного пакета Matlab разработана модель, позволяющая моделировать дискретно-событийные модели. Модель самоходных опрыскивателей среди Stateflow для оценки коэффициента готовности при проведении технического контроля над программами. Результатами имитационного моделирования являются значения коэффициента готовности при различных программах технического контроля – $K_{g1}=0,88$ и $K_{g2}=0,90$, что позволяет сделать вывод о влиянии программы технического контроля на самоходных опрыскивателей на значение коэффициента готовности. Вероятности ошибок при этом варьировались в пределах от 0 до 1 и принадлежали равными: $\alpha_1 = \alpha_2$ и $\beta_1 = \beta_2$, что вполне обосновано в случаях, когда технический контроль отличается только местом измерения параметра технического состояния, а средства измерения одинаковы. Автором установлено, что коэффициент готовности чувствителен к ошибке второго рода в данном случае. Пути дальнейших исследований встречаются в исследовании других программ технического контроля самоходных опрыскивателей, в которых коэффициент готовности чувствителен к вероятности ошибок первого рода.

Ключевые слова: имитационная модель, коэффициент готовности, самоходный опрыскиватель, технический контроль.

readiness factor. The probabilities of errors varied from 0 to 1 and were equal: $\alpha_1 = \alpha_2$ and $\beta_1 = \beta_2$, which is quite justified in cases where technical control differs only in the place of measurement of the technical condition parameter, and the measuring instruments are the same. The author found that the readiness factor is sensitive to errors of the second kind in this case. Ways of further research are found in the study of other programs of technical control of self-propelled sprayers, in which the readiness factor is sensitive to the probability of errors of the first kind.

Key words: simulation model, readiness factor, self-propelled sprayer, technical control.

I. С. Любченко ORCID 0000-0001-5259-1760.

ANALYTICAL PROVISIONS FOR EVALUATION OF READY CAPITAL RATIO OF SELF-PROPELLED SPRAYERS UNDER TECHNICAL CONTROL MODES

I. S. Lyubchenko

Abstract. The main indicator used for the reliability study is the readiness factor, which means the probability that a self-propelled sprayer will be operational at any time, except for planned periods during which the intended use of self-propelled sprayers is not expected. Derivation of the analytical expression for the readiness factor K_g is a rather time-consuming operation. The complexity increases with the complication of the graph, ie in an effort to take into account more technical conditions, factors that affect the process of technical control of self-propelled sprayers. Therefore, it is advisable to solve the problem of such a plan using a simulation model. Using the Stateflow modeling tool of the Matlab software package, a model has been developed that allows modeling discrete-event models. Model of self-propelled sprayers among Stateflow for estimating the coefficient of readiness during technical control of programs. The results of simulation are the values of the readiness factor for different technical control programs - $K_{g1}=0.88$ and $K_{g2}=0.90$, which allows us to draw conclusions about the impact of the technical control program of self-propelled sprayers on the value of the