УДК 631.3:62-192

А.І. Бойко, проф., д-р техн. наук, А.В. Новицький, доц., канд. техн. наук, О.О. Банний, асист.
Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ

Оцінка надійності системи «людина-машина» в умовах зниження рівня її працездатності й удосконаленні складової «людина-оператор»

Розроблена стохастична модель і проведено аналіз системи «Людина-Машина». Отримана модель для визначення ймовірності безвідмовної роботи системи для умови підвищення професійного та психофізіологічного рівня оператора.
надійність, система, модель, машина, оператор, відмова , відновлення

А.И. Бойко, А.В.Новицкий, А.А. Банный
Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, г. Киев
Оценка надёжности системы «человек-машина» в условиях снижения уровня её работоспособности и совершенствования составляющей « человек-оператор»

Разработана стохастическая модель и проведён анализ системы «Человек-Машина». Получена модель для определения вероятности безотказной работы системы для условия повышения профессионального и психофизиологического уровня оператора.
надёжность, система, модель, машина, оператор, отказ, восстановление

Постановка проблеми. В реальних умовах експлуатації змінюється технічний стан складної сільськогосподарської техніки, як системи «людина-машина» («ЛМ»). При встановленні надійності системи «ЛМ» розглядається вплив на ймовірність безвідмовної роботи системи двох складових: «Людина-оператор» і «Машина». В процесі експлуатації системи «ЛМ» змінюються показники надійності машини та настає її «старіння», вона проходить періоди «припрацювання», «нормальної роботи» та «граничного стану», які обумовлені процесами зношування, кородування, деформування, старіння та інші. Складова системи «ЛМ» «Людина-оператор» також не залишається без зміни, оскільки змінюються характерні показники її надійності [11]: ймовірність безпомилкової роботи «Людини-оператора», своєчасність вирішення завдання та ймовірність виправлення помилки «Людиною-оператором»».

Тобто, постає необхідність проведення досліджень впливу на надійність системи «ЛМ» не лише технічного стану техніки, але й професійно-психофізілогічного рівня «Людини-оператора» (персоналу).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На думку вчених і спеціалістів різних галузей економіки [6, 9, 10, 12], для забезпечення надійності систем «ЛМ» заводи і підприємства-виготовлювачі техніки повинні вирішувати не лише питання забезпечення своїх виробів нормативно-технічною документацією, запасними частинами, післягарантійним обслуговуванням, але й навчання кваліфікованих кадрів. Підвищення ефективності системи забезпечення надійності сільськогосподарських машин в значній мірі залежать від підготовлeності керівників і фахівців до сучасних, новітніх технологій технічного обслуговування, ремонту і тенденцій розвитку економіки. В останні роки в наукових виданнях України з'явились дослідження [1, 4, 5], в яких розглядаються питання забезпечення надійності сільськогосподарської техніки, як складних систем. В представлених статтях об'єктами досліджень виступали машини або ж системи «Машина-база ТО».

В роботах [1, 3] показано, що одним з перспективних напрямків розвитку системи «Машина-база ТО», коли проходить старіння техніки і досягнуто певний рівень ремонтно-обслуговуючої бази, є резервування. Разом з тим, взаємозв'язок рівня експлуатації складної сільськогосподарської техніки з рівнем кваліфікації операторів (персоналу), в Україні ще недостатньо вивчено. Як показує аналіз, стався розрив між рівнем конструктивної складності, технічної досконалості сучасних сільськогосподарських машин і рівнем кваліфікації операторів та спеціалістів технічного сервісу, рівнем організації технічного сервісу та роботи інженерної служби підприємств. Практика використання систем «ЛМ» показує, що одним із резервів підвищення професійно-психофізіологічного рівня складової «Людина-оператор» є підвищення кваліфікації працівників.

Постановка завдання. Метою представленої статті є проведення теоретичних досліджень, які направлені на встановлення закономірностей зміни ймовірності безвідмовної роботи систем «ЛМ», рівень надійності яких можна підвищити шляхом удосконалення складової «Людина-оператор».

Виклад основного матеріалу. Дослідження надійності системи «ЛМ» в умовах зниження рівня працездатності складової «Машина» й удосконаленні складової «Людина-оператор» можна представити у вигляді графа стану і переходів системи (рис. 1). Проаналізуємо можливі стани системи: "0" – працездатний стан; "1" – непрацездатний стан (усунення відмов оператора та усунення відмов машини); "$0'$" – проміжний (фіктивний стан) «старіння» машини; "$0''$" – проміжний (фіктивний стан) «старіння» оператора; "$1''$" - проміжний (фіктивний стан) підвищення свого професійно-психофізіологічного рівня оператором; $\lambda_0, \lambda_0', \lambda_0'', \lambda_1, \lambda_1''$ - інтенсивності відмов; μ - інтенсивність відновлень. Для представленої системи «ЛМ» напрацювання на відмову зменшується, а інтенсивність відмов відповідно збільшується, переводячи систему з працездатного стану в непрацездатний.

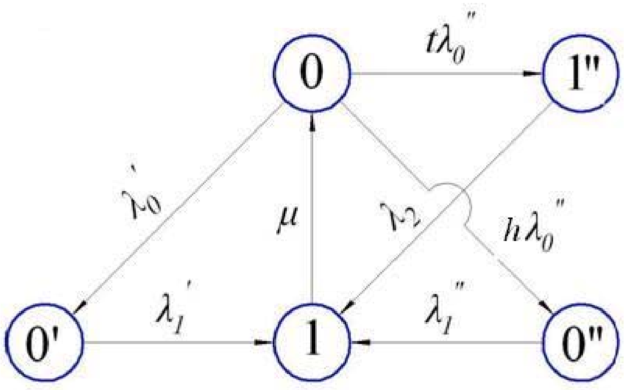

Рисунок 1 – Граф станів і переходів системи «ЛМ» для «старіючих» машин і операторів, які підвищують свій професійно-психофізіологічний рівень

На підставі побудованого графу станів і переходів складені диференційні рівняння динамічного балансу для ймовірностей станів системи «ЛМ» [13]:

$$\begin{cases} \dfrac{d}{dt}P_0(t) = \mu P_1(t) - \lambda'_0 P_0(t) - h\lambda''_0 P_0(t) - t\lambda''_0 P_0(t); \\ \dfrac{d}{dt}P'_0(t) = \lambda'_0 P_0(t) - \lambda'_1 P'_0(t); \\ \dfrac{d}{dt}P''_0(t) = h\lambda''_0 P_0(t) - \lambda''_1 P_1(t); \\ \dfrac{d}{dt}P_1(t) = \lambda'_1 P'_0(t) + \lambda_2 P''_1(t) + \lambda''_1 P''_0(t) - \mu P_1(t); \\ \dfrac{d}{dt}P''_1(t) = t\lambda''_0 P_0(t) - \lambda_2 P''_1(t). \end{cases} \tag{1}$$

де $P_0(t)$ - ймовірність перебування системи в працездатному стані;

$P'_0(t)$ - ймовірність перебування системи в проміжному стані (фіктивному стані) – «старінні» машини;

$P''_0(t)$ - ймовірність перебування системи в проміжному стані (фіктивному стані) – «старінні» оператора;

$P_1(t)$ - ймовірність перебування системи в непрацездатному стані;

$P''_1(t)$ - ймовірність перебування системи в проміжному стані (фіктивному стані) – для умови підвищення свого професійно-психофізіологічного рівня оператором.

Для представленої системи (1) запишемо нормувальну умову, яка представляє суму ймовірностей станів системи «ЛМ»:

$$P_0(t) + P'_0(t) + P''_0(t) + P_1(t) + P''_1(t) = 1\,.$$

Накладемо умову, що в початковий період експлуатації представлена система працездатна, і може виконувати задані функції згідно вимог нормативно-технічної і конструкторської документації. Тобто, для системи (рис. 1) можна записати:

$$P_0(t) = 1; P'_0(t) = 0; P''_0(t) = 0; P_1(t) = 0; P''_1(t) = 0.$$

На основі перетворень Лапласа, систему диференційних рівнянь (1) можна представити у вигляді системи алгебраїчних рівнянь:

$$\begin{cases} S\varphi_0(S) = -t\lambda''_0 P_0(S) - \lambda'_0 P_0(S) - h\lambda'' P_0(S) + \mu P_1(S) + 1; \\ S\varphi'_0(S) = \lambda'_0 P_0(S) - \lambda'_1 P'_0(S); \\ S\varphi''_0(S) = h\lambda''_0 P_0(S) - \lambda''_1 P_1(S); \\ S\varphi_1(S) = \lambda'_1 P'_0(S) + \lambda''_1 P''_0(S) - \mu P_1(S) + \lambda_2 P''_1(S); \\ S\varphi''_1(S) = t\lambda''_0 P_0(S) - \lambda_2 P''_1(S). \end{cases} \tag{2}$$

У відповідності до отриманої системи (2), згідно перетворень Лапласа, нормувальна умова прийме наступний вигляд:

$$S\varphi_0(S) + S\varphi'_0(t) + S\varphi''_0(t) + S\varphi_1(S) + S\varphi''_1(t) = 1.$$

З аналізу системи (2) бачимо, що найбільш раціонально для подальшого розв’язку можна провести заміну першого рівняння нормувальною умовою:

$$\begin{cases} S\varphi_0(S) + S\varphi_0'(t) + S\varphi_0''(t) + S\varphi_1(S) + S\varphi_1''(t) = 1; \\ S\varphi_0'(S) = \lambda_0'\varphi_0(S) - \lambda_1'\varphi_0'(S); \\ S\varphi_0''(S) = h\lambda_0''\varphi_0(S) - \lambda_1''\varphi_1(S); \\ S\varphi_1(S) = \lambda_1'\varphi_0'(S) + \lambda_1''\varphi_0''(S) - \mu\varphi_1(S) + \lambda_2\varphi_1'''(S); \\ S\varphi_1''(S) = t\lambda_0''\varphi_0(S) - \lambda\varphi_1''(S). \end{cases} \tag{3}$$

Далі, проведемо групування членів рівнянь системи (3) у відповідності з визначенням невідомих ймовірностей перебування системи «ЛМ» в одному із станів $\varphi_i(S)$. Виходячи з цього, після ряду перетворень система (3), сформуємо детермінант, який представляє собою коефіцієнт при невідомих у вигляді матриці:

$$\Delta = \left| \begin{array}{ccccc} S & S & S & S & S \\ -\lambda_0' & (S+\lambda_1') & 0 & 0 & 0 \\ -h\lambda_0'' & 0 & 0 & (S+\lambda_1'') & 0 \\ 0 & -\lambda_1' & -\lambda_1'' & (S+\mu) & -\lambda_2 \\ -t\lambda_0'' & 0 & 0 & 0 & (S+\lambda_2) \end{array} \right| \left\| \begin{array}{c} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{array} \right| . \tag{4}$$

Як видно з (4), детермінант представляє собою квадратну матрицю п'ятого порядку. Для вирішення даної матриці застосуємо метод Гауса. Реалізація методу Гауса може бути виконана на протязі кількох етапів перетворень матриці (4) шляхом перемноження лівих і правих сторін рівнянь на одне і теж число і відрахування від одного рівняння другого. Представлені перетворення не змінять рішення початкової матриці, але дадуть можливість поступового виключення невідомих з окремих рівнянь. Розглянемо основні етапи розрахунків:

1.1а. Визначимо множник, як $\frac{-\lambda_0'}{1} = -\lambda_0'$.

1.1б. Помножимо перший рядок матриці (4) на отриманий множник. Після перемноження отримаємо:

$[-\lambda_0']$; $[-\lambda_0']$; $[-\lambda_0']$; $[-\lambda_0']$; $[-\lambda_0']$; $[-\lambda_0']$.

1.1в. Вирахуємо від другого рядка матриці (4) рядок, який отримано в п.1.1б:

$[(-\lambda_0' - (-\lambda_0')]$; $[(S + \lambda_1' - (-\lambda_0')]$; $[(0-(-\lambda_0')]$; $[(0-(-\lambda_0')]$; $[(0-(-\lambda_0')]$; $[(0-(-\lambda_0')]$.

Після виконання дій можемо записати:

$[0]$; $[(S+\lambda_1'+\lambda_0')]$; $[\lambda_0']$; $[\lambda_0']$; $[\lambda_0']$; $[\lambda_0']$.

Отриманий рядок задає друге рівняння нової перетвореної системи рівнянь в наступному вигляді:

$$0 + (S + \lambda_1' + \lambda_0')P_0' + \lambda_0' P_0'' + \lambda_0' P_1 + \lambda_0' P_1'' = \lambda_0'. \tag{5}$$

Другий крок перетворень початкової матриці (4) проводимо для першого і третього рядків аналогічно 1.1а – 1.1в.

1.2а. Визначимо множник $\frac{-h\lambda_0'}{1} = -h\lambda_0''$.

1.2б. Помножимо першу строчку матриці (5) на отриманий множник:

$[-h\lambda_0'']$; $[-h\lambda_0'']$; $[-h\lambda_0'']$; $[-h\lambda_0'']$; $[-h\lambda_0'']$; $[-h\lambda_0'']$.

1.2в. Вирахуємо від третього рядка матриці (4) ряд, який отримано в пункті 1.2б. Виходячи з цього, можемо записати:

$$[(-h\lambda''_0)-(-h\lambda''_0)];\ [0-(-h\lambda''_0)];\ [0-(-h\lambda''_0)];\ [(S+\lambda''_1)-h\lambda''_0)];\ [0-(-h\lambda''_0)];\ [0-(-h\lambda''_0)].$$

Після спрощення запишемо:

$$[0];\ [h\lambda''_0];\ [h\lambda''_0];\ [(S+\lambda''_1+h\lambda''_0)];\ [h\lambda''_0];\ [h\lambda''_0].$$

Звідси, можемо записати третє рівняння нової перетвореної системи в наступному вигляді:

$$0+h\lambda''_0P'_0+h\lambda''_0P''_0+(S+\lambda''_1+h\lambda''_0)P_1+h\lambda''_0P''_1=h\lambda''. \qquad (6)$$

Третій крок перетворень початкової матриці Δ (4) є повторення попередніх дій, але для першого і четвертого рядків.

1.3а. Визначимо множник: $\frac{0}{1}=0.$

1.3б. Помножимо перший рядок матриці (5) на знайдений множник:

$$[0];\ [0];\ [0];\ [0];\ [0];\ [0].$$

1.3в. Вирахуємо від четвертого рядка матриці (4) рядок, який отримано в пункті 1.3б:

$$[0];\ [-\lambda'_1-0];\ [-\lambda''_1-0];\ [(S+\mu)-0];\ [-\lambda_2];\ [0].$$

Після спрощення отриманих значень, можемо записати:

$$[0];\ [-\lambda'_1];\ [-\lambda''_1];\ [(S+\mu)];\ [-\lambda_2];\ [0].$$

Запишемо рядок коефіцієнтів, який задає четверте рівняння нової перетвореної системи:

$$0-\lambda'_1P'_0-\lambda''_1P''_0+(S+\mu)P_1-\lambda_2P''_1=0. \qquad (7)$$

Четвертий крок перетворень початкової матриці Δ також є повторенням початкових дій, але по відношенню до першого і п'ятого рядків.

1.4а. Визначимо множник для представлених рядків: $\frac{-t\lambda''_0}{1}=-t\lambda''_0.$

1.4б. Також помножимо першу строчку матриці (4) на отриманий множник:

$$[-t\lambda''_0];\ [-t\lambda''_0];\ [-t\lambda''_0];\ [-t\lambda''_0];\ [-t\lambda''_0];\ [-t\lambda''_0].$$

1.4в. Вирахуємо від п'ятого рядка матриці (4) рядок, який отримаємо в пункті 1.4б:

$$[(-t\lambda''_0)-(-t\lambda''_0)];\ [0-(-t\lambda''_0)];\ [0-(-t\lambda''_0)];\ [(0-(-t\lambda''_0)];\ [(S+\lambda_2)-(-t\lambda''_0)];\ [(0-(-t\lambda''_0)].$$

Використовуючи отриману стрічку коефіцієнтів, запишемо п'яте рівняння для нової перетвореної системи:

$$0+t\lambda''_0P'_0+t\lambda''_0P''_0+t\lambda''_0P_1+(S+\lambda_2+t\lambda''_0)P''_1=t\lambda''_0. \qquad (8)$$

Враховуючи, що перше рівняння в новій системі зберігається, як і в матриці (4), а наступні рівняння визначаються отриманими залежностями (5 - 8), можемо записати нову перетворену систему. Отримана нова система рівнозначна по вирішенню:

$$\begin{cases} P_0+P'_0+P''_0+P_1+P''_1=1; \\ 0+(S+\lambda'_1+\lambda'_0)P'_0+\lambda'_0P''_0+\lambda'_0P_1+\lambda'_0P''_1=\lambda'_0; \\ 0+h\lambda''_0P'_0+h\lambda''_0P''_0+(S+\lambda''_1+h\lambda''_0)P_1+h\lambda''_0P''_1=h\lambda''_0; \\ 0-\lambda'_1P'_0-\lambda''_1P''_0+(S+\mu)P_1-\lambda_2P''_1=0; \\ 0+t\lambda''_0P'_0+t\lambda''_0P''_0+t\lambda''_0P_1+(S+\lambda_2+t\lambda''_0)P''_1=t\lambda_0. \end{cases} \qquad (9)$$

Для вирішення отриманої приведеної системи (9) також можемо використати метод Гаусса. Для другого етапу розрахунків із системи (9) отримаємо розширену матрицю Δ'.

$$\left.\begin{array}{ccccc|l}
a'_{11}=1 & a'_{12}=1 & a'_{13}=1 & a'_{14}=1 & a'_{15}=1 & b'_1=1, \\
a'_{21}=0 & a'_{22}=(S+\lambda'_1+\lambda'_0) & a'_{23}=\lambda'_0 & a'_{24}=\lambda'_0 & a'_{25}=\lambda'_0 & b'_2=\lambda'_0, \\
a'_{31}=0 & a'_{32}=h\lambda''_0 & a'_{33}=h\lambda''_0 & a'_{34}=(S+\lambda''_1+h\lambda''_0) & a'_{35}=h\lambda''_0 & b'_3=h\lambda''_0, \\
a'_{41}=0 & a'_{42}=-\lambda'_1 & a'_{43}=-\lambda''_1 & a'_{44}=(S+\mu) & a'_{45}=-\lambda_2 & b'_4=0, \\
a'_{51}=0 & a'_{52}=t\lambda''_0 & a'_{53}=t\lambda''_0 & a''_{54}=t\lambda''_0 & a''_{55}=(S+\lambda_2+t\lambda''_0) & b_5=t\lambda''_0
\end{array}\right. \qquad (10)$$

Після цілого ряду перетворень і використання представленої вище методики, отримаємо залежності для визначення ймовірностей перебування системи «ЛМ» в різних станах:

$$P_1=\frac{(-h\lambda''_0\lambda''_1(1+\lambda'_1+2\lambda'_0))(S^4+2S^3\lambda'_1+2S^3\lambda'_0+2S^3\lambda_2-2S^3t\lambda''_0)}{(S^2h\lambda''_0-S^2\lambda''_1+h\mu\lambda''_0)(S^4+2S^3\lambda'_1+2S^3\lambda'_0+2S^3\lambda_2-2S^3t\lambda''_0)+S^2h\lambda''_0(\lambda_2+\lambda''_1))}. \quad (11)$$

$$P''_1=-\frac{(-St\lambda''_0)(-Sh\lambda''_0\lambda''_1(1+\lambda'_1+2\lambda'_0))}{(S^2h\lambda''_0-S^2\lambda''_1+h\mu\lambda''_0)(S^4+2S^3\lambda'_1+2S^3\lambda'_0+2S^3\lambda_2-2S^3t\lambda''_0)+S^2h\lambda''_0(\lambda_2+\lambda''_1))}. \quad (12)$$

$$P''_0=\frac{h\lambda''_0(S+\lambda'_1)-((S+\lambda'_1-\lambda'_0)(S+\lambda''_1+h\lambda''_0)-\lambda'_0h\lambda''_0)P_1+h\lambda''_0(S+\lambda'_1)P''_1}{h\lambda''_0(S+\lambda'_1)}. \qquad (13)$$

$$P'_0=\frac{\lambda'_0(1-P''_0-P_1-P''_1)}{(S+\lambda'_1-\lambda'_0)}. \qquad (14)$$

На основі отриманих аналітичних залежностей (11) – (14) для встановлення ймовірностей перебування системи в станах P'_0, P''_0, P_1, P''_1 ймовірність перебування системи «ЛМ» в стані P_0 буде становити:

$$P_0=1-(P'_0+P''_0+P_1+P''_1). \qquad (15)$$

Висновки. Оскільки представлена система «Людина-Машина» є такою, що відновлюється при втраті працездатності, її надійність найкраще характеризується ймовірністю безвідмовної роботи. Завданням подальших дослідження представленої системи є спрощення отриманих аналітичних залежностей (11-15) та встановлення невідомих, якими є ймовірнісні характеристики станів. Завдяки їх визначенню відкривається можливість виявлення основних показників надійності, а також їх зміни в процесі експлуатації.

Список литературы

1. Anatoliy Boyko. Теоретические исследования надёжности кукурузоуборочной техники при использовании резервирования / Anatoliy Boyko, Oleksandr Bondarenko, Kostyantyn Dumenko // Motoryzacia i energetyka rolnictwa. – Lublin, 2011. – Vol. 13A. – С. 131 – 138.
2. Бойко А.І. Математичне моделювання системи «людина-машина» при накопиченні відмов/ А.І. Бойко, А.В. Новицький // Вісник ХНТУСГ ім. Петра Василенка. – Харків, ХНТУСГ, 2013. – Вип. 134. – С. 75 - 79.

3. Бойко А.И. Математическая формализация описания состояний и переходов пассивно резервируемых технических систем / А.И. Бойко, А. В. Бондаренко, В.Н. Савченко // Вестник ХНТУСХ им. П. Василенка. - Выпуск №133. - Харків, ХНТУСГ, 2013. – С. 216-220.
4. Бойко А.И. Стохастическое моделирование работы пневмомеханическая высевающего аппарата / А.И. Бойко, А.А. Банный // Научный вестник НАУ, серия «Техника и энергетика АПК» - К., 2011. - Выпуск 166, часть 1. - С. 112 - 118.
5. Бойко А.И. Установление функции восстановления подсистем зерноуборочных комбайнов в условиях развития сферы технического обслуживания / А.И. Бойко, К.Н. Думенко // Вестник ЛНАУ. Агроинженерного исследования - Львов, 2010. - Т.1, № 14. - С. 12-20.
6. Бойко А.І. Вплив оператора на надійність систем «людина-машина-середовище» (на прикладі засобів для приготування і роздавання кормів) / А.І. Бойко, А.В. Новицький, З.В. Ружило, А.З. Ружило // ХНТУСГ ім. Петра Василенка. – Харків, ХНТУСГ, 2011. – Вип. 114. – С. 103 – 108.
7. Бойко А.І. Математичне моделювання системи «людина-машина» при накопиченні відмов/ А.І. Бойко, А.В. Новицький // Вісник ХНТУСГ ім. Петра Василенка. – Харків, ХНТУСГ, 2013. – Вип. 134. – С. 75 - 79.
8. Дружинин Г.В. Надёжность автоматизированных систем / Г.В. Дружинин. Изд. 3-е перераб. и доп. - М., «Энергия», 1977. – 536 с.
9. Крайнік О.М. Оцінка надійності управлінського персоналу / О.М. Крайнік // Всеукраїнський науково-виробничий журнал Університету економіки і підприємництва. – Хмельницький, - 2012. – С. 62-64.
10. Лехман С.Д. Методологія дослідження небезпечних процесів при функціонуванні ергативних систем аграрного виробництва / С.Д. Лехман, М.В. Панфілова // Техніка та енергетика АПК: збірник наукових праць НУБіПУ. – К.: НУБіПУ, 2011. – Вип. 166, ч. 1. – С. 294–301.
11. Новицький А.В. Методичні підходи оцінки надійності людини-оператора, як складової систем «людина-машина-середовище»/ А.В. Новицький, З.В. Ружило, О.А.Новицька // ХНТУСГ ім. Петра Василенка. – Харків, ХНТУСГ, 2013. – Вип. 132. – С. 103 – 108.
12. Роговський І.Л. Вплив показників надійності на періодичність технічного обслуговування сільськогосподарських машин / І.Л. Роговський // Motrol, motoryzacia i energetyka rolnictwa motorization and power industry in agriculture. – Lublin, 2011. – Vol. 13B. – C. 92 – 97.
13. Ушаков А.И. Курс теории надёжности систем / А.И. Ушаков // - М., ДРОФА, 2008. - 239 с.

A. Boyko, A. Novitskiy, O. Bannyi
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kiev
Assessment of system reliability «human-machine», when accumulation failures

The aim of the presented paper is to elucidate the changes in the probability of failure-free operation of the "human-machine".

A stochastic model and carried out a systematic analysis of the "human-machine" the accumulation of failures. The resulting differential equations of dynamic balance of probabilities states of the system.

An analytical dependence for the determination of the probability of system failure in the process of "aging" of the machine and the professional and psycho-physiological level operator.
reliability, system, model, machine, operator, failure, restoration

Одержано 17.11.13