

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНКЦИИ ГОТОВНОСТИ СИСТЕМЫ «ЧЕЛОВЕК-МАШИНА» ПРИ НАКОПЛЕНИИ ПОВРЕЖДЕНИЙ

*Андрей Новицкий*

*Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины  
Украина, г. Киев, ул. Героев Оборона, 15*

*Andrey Novytsky*

*National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine  
Heroiv Oborony Str., 15, Kiev, Ukraine*

**Аннотация.** Разработана стохастическая модель и проведён анализ системы «человек-машина» при накоплении отказов. Получена аналитическая зависимость для определения вероятности безотказной работы системы в период ухудшения технического состояния машины и снижения профессионального и психофизиологического уровня оператора.

**Ключевые слова:** система, надёжность, модель, машина, оператор, отказ, восстановление.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Надёжность многооперационных сельскохозяйственных машин, как сложных технических систем зависит не только от совершенства их конструкций, но и от профессионального отношения обслуживающего персонала к машинам, которые обслуживаются. Возникает необходимость акцентирования внимания на изучение функционирования социотехнических систем вида «человек-машина» (СТС «ЧМ»). Нестабильность условий эксплуатации, снижение влияния ремонтно-обслуживающей базы на поддержание техники в работоспособном состоянии, ухудшение технического состояния сельскохозяйственных машин, профессиональный и психофизиологический уровень операторов (трактористов, водителей, слесарей-ремонтников, управленческого персонала) существенно затрудняют оценку показателей надёжности техники и определения необходимых их значений.

### АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На основании сказанного, формирование потоков отказов и восстановлений, динамика изменения составляющих системы «человек-машина» СТС «ЧМ» не могут быть описаны

в рамках марковских случайных процессов переходов систем в различные возможные состояния. Однако, для системного анализа надёжности СТС с использованием этого математического аппарата, в работах профессоров Ушакова И.А., Нечипоренко [14, 15, 19] предложено введение дополнительных фиктивных состояний. При аналитических исследованиях «стареющих» СТС «ЧМ» немарковские процессы заменяются на марковские. В результате таких преобразований усложняется граф состояний и переходов системы, однако упрощается математический аппарат их анализа [9, 10, 12].

В последние годы в научных изданиях Украины появились исследования [1, 2, 4, 5, 7], в которых рассматриваются вопросы обеспечения надёжности сельскохозяйственной техники, как сложных систем. В представленных статьях объектами исследований выступали машины или системы «машина-база ТО». Рассмотрены ситуации, когда одновременно меняются, как технический уровень машин, так и потенциальные возможности базы технического обслуживания. Но, как показывает анализ, в представленных работах не отражено влияние человека на надёжность техники, то есть не взяты во внимание подсистемы «человек-оператор» или «человек-слесарь», обеспечивающих эффективное использование и поддержание работоспособности машин. Вместе с тем, именно от профессионального уровня операторов и слесарей, их отношения к служебным обязанностям и умение своевременно устранять отказы, зависит надёжность сельскохозяйственной техники [3, 6, 13].

### ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью представленной работы является проведение теоретических исследований, посвященных выявлению закономерностей

изменения вероятности безотказной работы СТС «человек-машина», уровень надёжности которой снижается с увеличением интенсивностей отказов двух составляющих системы.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Проблеме определения вероятности безотказной работы СТС «ЧМ», которыми являются сельскохозяйственные машины в условиях старения техники и снижения профессионального и психофизиологического уровня «человека-оператора», посвящено исследование [3], где построен граф и представлена стохастическая модель состояний и переходов системы «ЧМ» при накоплении отказов (рисунок 1). Проведём анализ представленного графа: «0» - единственное состояние, которое характеризует готовность системы к работе; «1» - неработоспособное состояние (устранение отказов, возникших вследствие снижения работоспособности оператора и устранения отказов вследствие «старения» машины); «0'» - промежуточное (фиктивное состояние) снижение профессионального и психофизиологического уровня оператора; «0''» - промежуточное (фиктивное состояние) «старение» машины;  $\lambda'_0, \lambda''_0, \lambda'_1, \lambda''_1$  - интенсивности отказов;  $\mu$  - интенсивность восстановления.

Вероятность нахождения системы в этом состоянии определяется как вероятность  $P_0(t)$ .

На основании построенного графа переходов составлены дифференциальные уравнения динамического баланса (уравнения Колмогорова [8]) для вероятностей состояний и переходов системы «человек-машина» (1) [3]. Решение уравнений (1) предполагалось в преобразованиях Лапласа, которое дало новую систему уравнений (4) [3].

Определение вероятностей состояний представленной СТС «ЧМ» возможно через решение отношений (6) [3]. Для этого необходимо установить значение определителя главной матрицы  $\Delta$  системы уравнений (знаменатель), а также определителей, которые отвечают определяемым вероятностям (числителям). Матрица знаменателя имеет четвертый ранг, поэтому для её решения необходимо понижение.

Знаменатель  $\Delta$  в указанном уравнении определяется согласно матрицы (5) [3], а неизвестные согласно правила Крамера из выражений (6) [3]. Для полученной системы (4) [3], запишем зависимость для установления определителя, установив коэффициенты при неизвестных:

$$\Delta = \begin{vmatrix} (S + \lambda'_0 + \lambda''_0) - \mu & 0 & \lambda''_0 & 0 \\ S & S & S & S \\ -\lambda'_0 & 0 & S + \lambda'_1 & 0 \\ -\lambda''_0 & 0 & 0 & (S + \lambda''_1) \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix} \cdot (1)$$

Для определения значения  $\Delta$  в представленных выражениях, необходимо снизить его порядок, который можно провести, используя способ разложения определителя по элементам:

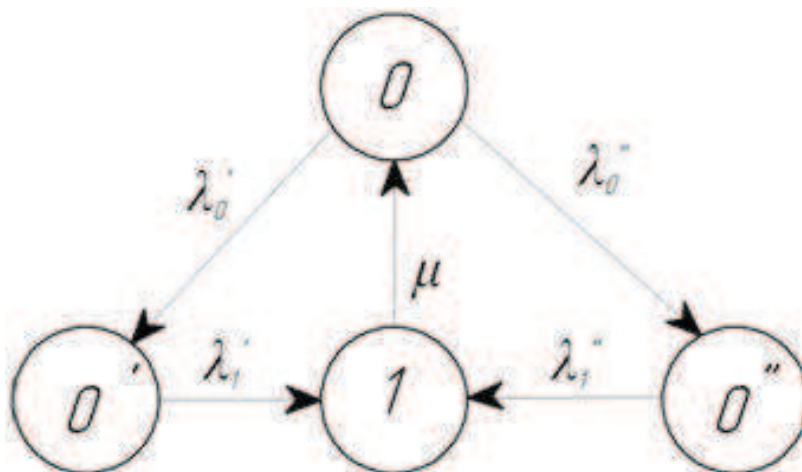


Рис. 1. Граф состояний и переходов системы «человек-машина».

Fig. 1. Graphic representation of states and transitions of «human-machine».

$$\Delta_0 = \begin{vmatrix} (S + \lambda'_0 + \lambda''_0) - \mu & 0 & 0 & 0 \\ S & S & S & S \\ -\lambda'_0 & 0 & (S + \lambda'_1) & 0 \\ -\lambda''_0 & 0 & 0 & (S + \lambda''_1) \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix} =$$

$$= S + \lambda'_0 \begin{vmatrix} S & S & S \\ 0 & (S + \lambda'_1) & 0 \\ 0 & 0 & (S + \lambda''_1) \end{vmatrix} + \mu \begin{vmatrix} S & S & S \\ -\lambda'_0 & (S + \lambda'_1) & 0 \\ -\lambda''_0 & 0 & (S + \lambda''_1) \end{vmatrix}$$

$$\Delta^1 = \begin{vmatrix} S & S & S \\ 0 & (S + \lambda'_1) & 0 \\ 0 & 0 & (S + \lambda''_1) \end{vmatrix} = S(S + \lambda'_1)(S + \lambda''_1).$$

$$\Delta^2 = \begin{vmatrix} S & S & S \\ -\lambda'_0 & (S + \lambda'_1) & 0 \\ -\lambda''_0 & 0 & (S + \lambda''_1) \end{vmatrix} = S(S + \lambda'_1)(S + \lambda''_1) - S(S + \lambda'_1)(-\lambda''_0) -$$

$$- S(-\lambda'_0)(S + \lambda''_1).$$

Получив значение  $\Delta^1$  и  $\Delta^2$ , проведем замену первой и второй составляющей выражений (6) [3] на  $(S + \lambda'_0)\Delta^1$  и  $\mu\Delta^2$ , для нахождения определителя:

$$\begin{aligned} \Delta &= (S + \lambda'_0 + \lambda''_0)\Delta^1 + \mu\Delta^2 = S^4 + S^3(\lambda'_1 + \lambda'_0 + \lambda''_0 + \lambda''_1) + \\ &S^2(\lambda'_0\lambda'_1 + \lambda''_0\lambda'_1 + \lambda'_1\lambda''_1 + \lambda'_0\lambda''_1) + S\lambda''_0\lambda'_1\lambda''_1 + S^3\mu + \\ &+ S^2(\lambda''_1\mu + \lambda'_1\mu + \lambda''_0\mu + \lambda'_0\mu) + S(\lambda'_1\lambda''_1\mu + \lambda''_0\lambda'_1\mu + \lambda'_0\lambda''_1\mu) = \\ &= S^4 + S^3(\lambda'_1 + \lambda'_0 + \lambda''_0 + \lambda''_1 + \mu) + S^2(\lambda'_0\lambda'_1 + \lambda''_0\lambda'_1 + \lambda'_1\lambda''_1 + \lambda'_0\lambda''_1 + \\ &+ \lambda''_1\mu + \lambda'_1\mu + \lambda''_0\mu + \lambda'_0\mu) + S(\lambda''_0\lambda'_1\lambda''_1 + \lambda'_1\lambda''_1\mu + \lambda''_0\lambda'_1\mu + \lambda'_0\lambda''_1\mu) \end{aligned} \quad (2)$$

Для определения значения определителя  $\Delta$  можно вынести общий множитель  $S$  и ввести замену в формулу (2):

$$\begin{aligned} K &= \lambda'_1 + \lambda'_0 + \lambda''_0 + \lambda''_1 + \mu, \\ P &= \lambda'_0\lambda'_1 + \lambda''_0\lambda'_1 + \lambda'_1\lambda''_1 + \lambda'_0\lambda''_1 + \lambda''_1\mu + \lambda'_1\mu + \lambda''_0\mu + \lambda'_0\mu, \\ N &= \lambda''_0\lambda'_1\lambda''_1 + \lambda'_1\lambda''_1\mu + \lambda''_0\lambda'_1\mu + \lambda'_0\lambda''_1\mu. \end{aligned}$$

Исходя из выведенных выше постоянных величин  $k$ ,  $p$  и  $n$ , формулу (2) можно записать в следующем виде:

$$\Delta = S[S^3 + KS^2 + PS + N] \quad (3)$$

Поскольку,  $\mu_i$  и  $\lambda_i$  являются величинами третьего и четвертого порядка малости,

то их третьей составляющей можно пренебречь. Исходя из этого, формулу (3) можно представить в следующем виде:

$$\Delta = S^2[S^2 + KS + P] \quad (4)$$

Для дальнейшего решения системы можно разложить знаменатели отношений (6) [3]

на простые множители. Для этого формулу (4) запишем в следующем виде:

$$S^2(S^2 + KS + P) = 0. \quad (5)$$

Два первые корни формулы (5) можно представить в виде квадратного уравнения:

$S_1 = S_2 = 0$ . Тогда составляющую формулы (5) в скобках можно записать в виде квадратного уравнения:

$$S_3 = -\frac{1}{2}(\lambda'_1 + \lambda'_0 + \lambda''_0 + \lambda''_1 + \mu) + \sqrt{\frac{1}{4}(\lambda'_1 + \lambda'_0 + \lambda''_0 + \lambda''_1 + \mu)^2 - (\lambda'_0\lambda'_1 + \lambda''_0\lambda'_1 + \lambda'_1\lambda''_1 + \lambda''_1\mu + \lambda'_1\mu + \lambda''_0\mu + \lambda'_0\mu)}. \quad (9)$$

То есть, дискриминантом уравнения является  $P - \frac{K^2}{4}$ , который для интенсивностей отказов и восстановлений принимает, как правило, отрицательное значение, а это приводит к двум действительным корням квадратного уравнения (6). Следующим шагом решения является обратная подстановка значений  $\lambda_i$  и  $\mu_i$  в формулы (7) и (8).

$$S_4 = -\frac{1}{2}(\lambda'_1 + \lambda'_0 + \lambda''_0 + \lambda''_1 + \mu) - \sqrt{\frac{1}{4}(\lambda'_1 + \lambda'_0 + \lambda''_0 + \lambda''_1 + \mu)^2 - (\lambda'_0\lambda'_1 + \lambda''_0\lambda'_1 + \lambda'_1\lambda''_1 + \lambda''_1\mu + \lambda'_1\mu + \lambda''_0\mu + \lambda'_0\mu)}. \quad (10)$$

После нахождения корней уравнений получаем:

$$\Delta = (S - S_1)(S - S_2)(S - S_3)(S + S_4). \quad (11)$$

Тогда выражение для определения неизвестных можно представить в следующем виде:

$$\varphi(S) = \frac{K}{S - S_1} + \frac{P}{S - S_2} + \frac{N}{S - S_3} + \frac{Q}{S - S_4}, \quad (12)$$

где  $K, P, N, Q$  - неизвестные постоянные величины, которые удовлетворяют представленные равенства.

Подставив полученные при расчетах значения  $\Delta$  и  $\Delta_0$  в первую формулу (6) [1], получим:

$$\varphi(S) = \frac{\Delta_0}{\Delta} = \frac{S(S + \lambda'_1)(S + \lambda''_1) + \mu(S + \lambda'_1)(S + \lambda''_1)}{S^2(S - S_3)(S - S_4)}. \quad (13)$$

После определения величин  $K, P, N$  и  $Q$ , входящих в аналитической зависимости (12), проведем обратные преобразования Лапласа:

$$P_0(t) = K_2(t) = K \exp(-S_1 t) + P \exp(-S_2 t) + N \exp(-S_3 t) + Q \exp(-S_4 t). \quad (14)$$

Зная, что значения корней  $S_1$  и  $S_2$  составляют  $S_1 = S_2 = 0$ , можно провести упрощение полученной выше аналитической зависимости. Подставим в зависимость (14) значения полученных постоянных  $K, P, N$  и  $Q$ , которые были установлены выше:

$$S^2(S^2 + KS + P) = 0. \quad (6)$$

Решением уравнения (6) будут:

$$S_3 = -\frac{k}{2} + \sqrt{\left(\frac{\hat{E}}{2}\right)^2 - p}, \quad (7)$$

$$S_4 = -\frac{k}{2} - \sqrt{\left(\frac{\hat{E}}{2}\right)^2 - p}. \quad (8)$$

$$\begin{aligned}
 P_0(t) = K_{\bar{a}}(t) = & \frac{\lambda_1' \lambda_1'' + \lambda_1'' \mu + \lambda_1' \mu}{S_3 S_4} + \\
 & + 1 - \frac{\lambda_1' \lambda_1'' + \lambda_1'' \mu + \lambda_1' \mu}{S_3 S_4} - \frac{-(\lambda_1'' + \lambda_1' + \mu) - S_4 + \frac{\lambda_1' \lambda_1'' + \lambda_1'' \mu + \lambda_1' \mu}{S_4}}{(S_3 + S_4)} \times \\
 & \times \exp(-S_3 t) + \frac{-(\lambda_1'' + \lambda_1' + \mu) - S_4 + \frac{\lambda_1' \lambda_1'' + \lambda_1'' \mu + \lambda_1' \mu}{S_4}}{(S_3 + S_4)} \exp(-S_4 t).
 \end{aligned} \tag{15}$$

На основе проведенных системных исследований получена аналитическая зависимость (15) для определения вероятности безотказной работы сложной системы «человек-машина» в любой момент времени  $t$ .

### ВЫВОД

На основе проведенных исследований установлено, что вероятность безотказной работы системы «человек-машина» для периода «старения» машины и при снижении профессионально-психологического уровня оператора, при накоплении повреждений описывается нелинейной функцией.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Anatoliy Boyko. 2011: Teoreticheskiye issledovaniya nadezhnosti kukuruzoborochnoy tekhniki pri ispolzovanii rezervirovaniya / Anatoliy Boyko, Oleksandr Bondarenko, Kostyantyn Dumenko // Motoryzacia i energetyka rolnictwa. – Lublin. – Vol. 13A. – 131–138.
2. Boyko A.I. 2011: Issledovaniye nadezhno-sti kukuruzoborochnykh mashin pri ikh starenii, neizmennoy baze tekhnicheskogo obsluzhivaniya i ispolzovaniya passivnogo rezervirovaniya / A.I. Boyko, A.V. Bondarenko // Obshchegosudarstvennyy mezhvedomstvennyy nauchno-tekhnicheskii sbornik KNTU, - Kirovograd. - Vypusk 41, chast 1. - 154-161.
3. Boyko A.I. 2013: Matematichne modelyuvannya sistemi «lyudina-mashina» pri nakopichenni vidmov/ A.I. Boyko, A.V. Novitskiy // Visnik KhNTUSG im. Petra Vasilenka. – Kharkiv, KhNTUSG. – Vip. 134. – 75-79.
4. Boyko A.I. 2011: Stokhasticheskoye modelirovaniye raboty pnevmomekhanicheskaya vyse-

vayushchego apparata / A.I. Boyko, A.A. Banny // Nauchnyy vestnik NAU, seriya «Tekhnika i energetika APK» - K. - Vypusk 166, chast 1. - 112 - 118.

5. Boyko A.I. 2010: Ustanovleniye funktsii vosstanovleniya podsistem zernoborochnykh kombaynov v usloviyakh razvitiya sfery tekhnicheskogo obsluzhivaniya / A.I. Boyko, K.N. Dumenko // Vestnik LNAU. Agroinzhenernogo issledovaniya - Lvov. - T.1, № 14. - 12-20.

6. Boyko A.I. 2011: Vpliv operatora na nadiynist sistem «lyudina-mashina-seredovishche» (na prikladi zasobiv dlya prigotuvannya i rozdavannya kormiv) / A.I. Boyko, A.V. Novitskiy, Z.V. Ruzhilo, A.Z. Ruzhilo // KhNTUSG im. Petra Vasilenka. – Kharkiv, KhNTUSG. – Vip. 114. – 103 – 108.

7. Boyko A.I. 2012: Problemi zabezpechennya nadiynosti suchasnoi skladnoi silskogospodarskoi tekhniki / A.I. Boyko, O.V. Bondarenko // Visnik Vinnitskogo natsionalnogo agrarnogo universitetu. Seriya: Tekhnichni nauki. - Vinnitsya. - Vipusk 11 (66). - 307 - 311.

8. Venttsel Ye.S. 1972: Issledovaniye operatsiy / Ye.S. Venttsel. – M.: Sovetskoye radio. – 552.

9. Golinkevich T.A. 1976: Prikladnaya teoriya nadezhnosti / T.A. Golinkevich. – M. Vysshaya shkola. – 160.

10. Gumenyuk V.M. 2010: Nadezhnost i diagnostika elektrotekhnicheskikh sistem: Ucheb. posobiye dlya vuzov / V.M. Gumenyuk. - Vladivostok: Izd-vo Dalnevost. gos. tekhn. un-ta. - 218.

11. Dzherald Sandler. 1966: Tekhnika nadezhnosti sistem / S. Dzherald; per. s angl. A.L. Raykina // Seriya «Teoreticheskiye osnovy tekhnicheskoy kibernetiki». – M., «Mir». – 300.

12. Druzhinin G.V. 1977: Nadezhnost avtomatizirovannykh sistem / G.V. Druzhinin. Izd. 3-e pererab. i dop. - M., «Energiya». – 536.
13. Lekhman S.D. 2011: Metodologiya doslidzhennya nebezpechnikh protsesiv pri funktsionuvanni yergativnykh sistem agrarno-go virobnitstva / S.D. Lekhman, M.V. Panfilova // Tekhnika ta yenergetika APK: zbirnik naukovykh prats NUBiPU. – K.: NUBiPU. – Vip. 166, ch. 1. – S. 294–301.
14. Nadezhnost tekhnicheskikh sistem: Spravochnik. 1985: / Yu.K. Belyayev, V.A. Bogatirev, V.V. Bolotin i dr.; pod red. I.A. Ushakova. – M.: radio i svyaz. – 608.
15. Nechiporenko V.I. 1977: Strukturnyy analiz sistem (effektivnosti i nadezhno-sti) / V.I. Nechiporenko. - M.: «Sovetskoye radio». - 211.
16. Raynshke K. 1979: Modeli nadezhnosti i chuvstvitelnosti sistem / K. Raynshke; per. s nem. B.A. Kozlova. - M., «Mir». – 454.
17. Rogovskiy I. 2012: Metodika prognozirovaniya ostatochnogo resursa mekhanizmov selskokhozyaystvennykh mashin \ I. Rogovskiy, O. Dubrovina // Motoryzacia i energetyka rolnictwa. – Lublin – Rzeszuw, Vol. 14 – No 3, 200-205.
18. Rogovskiy I.L. 2011: Vpliv pokaznikov nadiynosti na periodichnist tekhnichnogo obslugovuvannya silskogospodarskikh mashin / I.L. Rogovskiy // Motrol, motoryzacia i energetyka rolnictwa motorization and power industry in agriculture. – Lublin. – Vol. 13B. – 92 – 97.
19. Ushakov A.I. 2008: Kurs teorii nadezhnosti sistem / A.I. Ushakov // - M., DROFA. - 239.
20. Gennadiy Golub, Oleg Marus. 2011: Optimizatsiya parametriv mashin ta obladdannya Motrol Motoryzacja i energetyka rolnictwa Tom 13 B Lublin 15-17.

**Key words:** system, reliability, model, machine, operator, failure, restoration.

#### EVALUATION OF SYSTEM RELIABILITY «HUMAN-MACHINE», WHEN ACCUMULATION FAILURES

**Summary.** The developed stochastic model and conducted a systematic analysis of «human-machine» in accumulation of failures. The analytical dependence for determination of probability of failure of system during the «aging» of machine and reducing professional and psychophysical level operator.