

ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СОСТОЯНИЙ И ПЕРЕХОДОВ В ВОЗМОЖНЫЕ СОСТОЯНИЯ АКТИВНО РЕЗЕРВИРУЕМОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

¹Анатолій Бойко, ²Александр Бондаренко, ³Василий Савченко

¹Національний університет біоресурсів і природопольовання України

²Николаевский национальный аграрный университет

³Житомирский национальный агроэкологический университет

г. Киев, ул. Героев Обороны 15, ²г. Николаев, ул. Парижской Коммуны 9

¹Anatoliy Boyko, ²Olexander Bondarenko, ³Vasily Savchenko

¹National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine

²Mykolaiv National Agrarian University

³Zhytomyr National Agroecological University

Аннотация. Приведены результаты теоретических исследований для комплексной оценки общего положения и тенденций изменений надежной работы кукурузоуборочных машин. Построенная стохастическая модель состояний и переходов подсистем при пассивном резервировании

Ключевые слова: пассивное резервирование, граф состояний, интенсивность отказов, интенсивность возобновлений.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Нагруженное резервирование как конструктивный способ повышения надежности не нашло на сегодня еще достаточного использования в механических технических системах. Больше всего примеров его эффективного приложения можно видеть в радиоэлектронике, компьютерной технике, электротехнике, системах автоматики [6-8]. Еще больше примеров активного резервирования предоставляет живая природа в биологических системах, где проблема надежности превращаются в эволюционные проблемы выживания и развития того или другого вида.

Нагруженное резервирование является одной из самых эффективных способов повышения надежности систем [5, 12]. Однако его приложение предусматривает введение в конструкцию структурно избыточных элементов. Эти элементы, как правило, не являются крайне необходимыми для выполнения системой определенных для нее функций и вводятся в конструкцию, в первую очередь, для обеспечения необходимого уровня надежности, а иногда и для предоставления системе дополнительных возмож-

ностей и качеств при выполнении основных операций назначения [13, 16].

Таким образом, без преувеличений можно утверждать, что для достижения необходимого уровня надежности технических систем, особенно сложных, следует больше внимания уделить структурным средствам резервирования, среди которых важное место занимают нагруженные активные в виде параллельных соединений элементов.

Проблема эффективного использования нагруженного резервирования приобретает особое значение и актуальности при анализе отказов техники в реальных условиях ее использования. Определение динамики изменения показателей надежности в зависимости от состояния базы технического обслуживания машин является важным в нынешней ситуации, которая сложилась при механизации сельскохозяйственного производства.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Некоторые проблемы определения функции готовности подсистем сельскохозяйственной техники в условиях старения и развития базы технического обслуживания посвящены исследованию [9, 10, 14, 15], где построен соответствующий граф и стохастическая математическая модель состояний и переходов для систем "машина – техническое обслуживание". Но в данном исследовании вовсе не уделено внимания ненагруженному (холодному) резервированию с целью обеспечения необходимого уровня надежности существующего современного парка сельскохозяйственных машин.

ПОСТАНОВКА ЗАДАНИЯ

Целью данного исследования является установление комплексных показателей надежности активно резервируемых технических систем сельскохозяйственного назначения при условиях постепенно стареющей техники и постоянного состояния базы ее технического обслуживания.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Проведение такого исследования возможно путем системного анализа при моделировании процессов переходов исследуемой системы в разные возможные состояния и выявления вероятностей нахождения ее в том или другом состоянии с учетом динамических изменений в самой системе (старении машин).

Графическое описание поведения дублированной системы с нагруженным резервом согласно отмеченных условий функционирования представлено размеченным графом в работе [1-3], какой представлен на рис. 1.

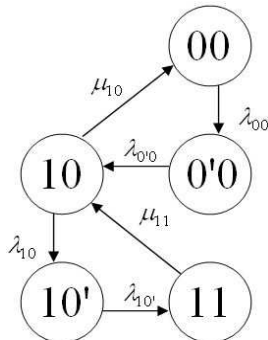


Рис. 1. Размеченный граф состояний и переходов системы при пассивном резервировании, стареющей технике и неизменном уровне сферы технического обслуживания
Fig. 1. Marked graph of states and transitions of the passive redundancy, aging techniques and the same level field maintenance service

В научном плане и практической реализации представляет интерес определения не только предельных возможностей системы с точки зрения ее надежности, но и динамике изменений показателей надежности на сквозняке срока эксплуатации. Динамические характеристики надежности могут предоставить полезный материал относительно рационального выбора как начальных, так и переходных параметров исследуемой системы [11, 17].

Размеченный граф состояний и переходов системы из состояния в состояние является основой для математического описания ее функционирования. Вероятностный характер поведения системы может быть описан соответствующими стохастическими дифференциальными уравнениями. Согласно правил складывания дифференциальных уравнений динамического баланса вероятностей (уравнений Колмагорова) запишем:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} P_{00}(t) = -\lambda_{00}P_{00}(t) + \mu_{11}P_{11}(t); \\ \frac{d}{dt} P_{0'0}(t) = -\lambda_{0'0-01}P_{0'0}(t) - \lambda_{0'0-0'0'}P_{0'0}(t) + \lambda_{00}P_{00}(t); \\ \frac{d}{dt} P_{0'0'}(t) = \lambda_{0'0-0'0'}P_{0'0}(t) - \lambda_{0'0'}P_{0'0'}(t); \\ \frac{d}{dt} P_{01}(t) = \lambda_{0'0-01}P_{0'0}(t) - \lambda_{01}P_{01}(t); \\ \frac{d}{dt} P_{0'1}(t) = \lambda_{0'0'}P_{0'0'}(t) + \lambda_{01}P_{01}(t) - \lambda_{0'1}P_{0'1}(t); \\ \frac{d}{dt} P_{11}(t) = \lambda_{0'1}P_{0'1}(t) - \mu_{11}P_{11}(t). \end{cases} \quad (1)$$

Нормируемое условие представляется суммой вероятностей состояний:

$$\sum_{i=1}^6 P_i = P_{00}(t) + P_{0'0}(t) + P_{0'0'}(t) + P_{01}(t) + P_{0'1}(t) + P_{11}(t) = 1$$

Исходя из того, что рассматриваемая дублированная техническая система начинает свою работу с исправного состояния, когда все элементы работоспособны, начальное условие можно записать в следующем виде [4]:

$$\begin{aligned} P_{00}(t) &= 1; & P_{0'0}(t) &= 0; & P_{0'0'}(t) &= 0; \\ P_{01}(t) &= 0; & P_{0'1}(t) &= 0; & P_{11}(t) &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Тогда в превращениях Лапласа с учетом начального условия имеем:

$$\begin{cases} S\varphi_{00}(S) = -\lambda_{00}\varphi_{00}(S) + \mu_{11}\varphi_{11}(S) + 1; \\ S\varphi_{0'0}(S) = -\lambda_{0'0-01}\varphi_{0'0}(S) - \lambda_{0'0-0'0'}\varphi_{0'0}(S) + \lambda_{00}\varphi_{00}(S); \\ S\varphi_{0'0'}(S) = \lambda_{0'0-0'0'}\varphi_{0'0}(S) - \lambda_{0'0'}\varphi_{0'0'}(S); \\ S\varphi_{01}(S) = \lambda_{0'0-01}\varphi_{0'0}(S) - \lambda_{01}\varphi_{01}(S); \\ S\varphi_{0'1}(S) = \lambda_{0'0'}\varphi_{0'0'}(S) + \lambda_{01}\varphi_{01}(S) - \lambda_{0'1}\varphi_{0'1}(S); \\ S\varphi_{11}(S) = \lambda_{0'1}\varphi_{0'1}(S) - \mu_{11}\varphi_{11}(S). \end{cases} \quad (3)$$

Нормируемое условие в превращениях Лапласа приобретает вид:

$$\varphi_{00}(S) + \varphi_{0'0}(S) + \varphi_{0'0'}(S) + \varphi_{01}(S) + \varphi_{0'1}(S) + \varphi_{11}(S) = 1/S \quad (4)$$

откуда

$$S\varphi_{00}(S) + S\varphi_{0'0}(S) + S\varphi_{0'0'}(S) + S\varphi_{01}(S) + S\varphi_{0'1}(S) + S\varphi_{11}(S) = 1 \quad (5)$$

Второе уравнение системы (3) представляет собой наибольшие сложности при ре-

шении, потому целесообразно его заменить на нормируемое условие (5):

$$\begin{cases} S\varphi_{00}(S) = -\lambda_{00}\varphi_{00}(S) + \mu_{11}\varphi_{11}(S) + 1; \\ S\varphi_{0v}(S) = 1 - S\varphi_{00}(S) - S\varphi_{0v}(S) - S\varphi_{01}(S) - S\varphi_{01}(S) - S\varphi_{11}(S); \\ S\varphi_{0v}(S) = \lambda_{0v-0v}\varphi_{0v}(S) - \lambda_{0v}\varphi_{0v}(S); \\ S\varphi_{01}(S) = \lambda_{0v-01}\varphi_{0v}(S) - \lambda_{01}\varphi_{01}(S); \\ S\varphi_{01}(S) = \lambda_{0v}\varphi_{0v}(S) + \lambda_{01}\varphi_{01}(S) - \lambda_{v1}\varphi_{v1}(S); \\ S\varphi_{11}(S) = \lambda_{v1}\varphi_{v1}(S) - \mu_{11}\varphi_{11}(S). \end{cases} \quad (6)$$

Перепишем уравнение, решив их относительно свободных членов:

$$\begin{cases} S\varphi_{00}(S) + \lambda_{00}\varphi_{00}(S) - \mu_{11}\varphi_{11}(S) = 1; \\ S\varphi_{0v}(S) + S\varphi_{00}(S) + S\varphi_{0v}(S) + S\varphi_{01}(S) + S\varphi_{01}(S) + S\varphi_{11}(S) = 1; \\ S\varphi_{0v}(S) - \lambda_{0v-0v}\varphi_{0v}(S) + \lambda_{0v}\varphi_{0v}(S) = 0; \\ S\varphi_{01}(S) - \lambda_{0v-01}\varphi_{0v}(S) + \lambda_{01}\varphi_{01}(S) = 0; \\ S\varphi_{01}(S) - \lambda_{0v}\varphi_{0v}(S) - \lambda_{01}\varphi_{01}(S) + \lambda_{v1}\varphi_{v1}(S) = 0; \\ S\varphi_{11}(S) - \lambda_{v1}\varphi_{v1}(S) + \mu_{11}\varphi_{11}(S) = 0. \end{cases} \quad (7)$$

Сгруппируем коэффициенты уравнений вокруг неизвестных:

$$\begin{cases} (S + \lambda_{00})\varphi_{00}(S) - \mu_{11}\varphi_{11}(S) = 1; \\ S\varphi_{0v}(S) + S\varphi_{00}(S) + S\varphi_{0v}(S) + S\varphi_{01}(S) + S\varphi_{01}(S) + S\varphi_{11}(S) = 1; \\ (S + \lambda_{0v})\varphi_{0v}(S) - \lambda_{0v-0v}\varphi_{0v}(S) = 0; \\ (S + \lambda_{01})\varphi_{01}(S) - \lambda_{0v-01}\varphi_{0v}(S) = 0; \\ (S + \lambda_{v1})\varphi_{v1}(S) - \lambda_{0v}\varphi_{0v}(S) - \lambda_{01}\varphi_{01}(S) = 0; \\ (S + \mu_{11})\varphi_{11}(S) - \lambda_{v1}\varphi_{v1}(S) = 0. \end{cases} \quad (8)$$

Ранжируем составляющие уравнений и выпишем расширенную матрицу полученной системы:

$\varphi_{00}(S)$	$\varphi_{0v}(S)$	$\varphi_{0v}(S)$	$\varphi_{01}(S)$	$\varphi_{01}(S)$	$\varphi_{11}(S)$	<i>свободные члены</i>
$S + \lambda_{00}$	0	0	0	0	$-\mu_{11}$	1
S	S	S	S	S	S	1
0	$-\lambda_{0v-0v}$	$S + \lambda_{0v}$	0	0	0	0
0	$-\lambda_{0v-01}$	0	$S + \lambda_{01}$	0	0	0
0	0	$-\lambda_{0v}$	$-\lambda_{01}$	$S + \lambda_{v1}$	0	0
0	0	0	0	$-\lambda_{v1}$	$S + \mu_{11}$	0

Выполняя правила превращений для работоспособного состояния "10", когда основной элемент конструкции отказал, а его место занял дублирующий, вероятность безотказной работы системы представляется выражением:

$$P_{10}(t) = A_{10} \exp(-S_1 t) + B_{10} \exp(-S_2 t) + C_{10} \exp(-S_3 t) + B_{10} \exp(-S_4 t) + E_{10} \exp(-S_5 t).$$

С учетом замен сокращенно можно записать:

$$P_{10}(t) = \mathcal{K}_{10} + D_{10} \exp(-S_4 t) + E_{10} \exp(-S_5 t). \quad (10)$$

Полученная формула вероятности имеет три составляющие. Ее анализ показывает, что при времени $t = 0$, вероятность $P_{10}(t)$ также равен нулю. Это согласуется с начальным условием работы исследуемых дублированной системы. С учетом возможных знаков при введенных постоянных величинах, структуре полученного уравнения (10) и сложности в определении знаков сопряженных корней S_4 и S_5 , анализ уравнения (10) может нести только качественный характер. Качественно, что изменение вероятности $P_{10}(t)$ имеет двойную экспоненциальную зависимость, при $t \rightarrow \infty$, $P_{10}(t \rightarrow \infty) = \mathcal{K}_{10}$. График такой зависимости изменения вероятности работоспособного состояния $P_{10}(t)$ при включении в работу резервного элемента и исключены основного представлено на рис. 2.

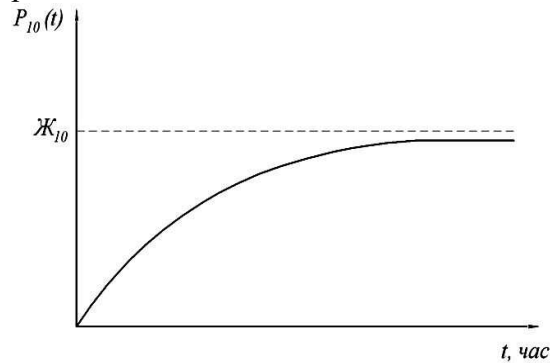


Рис. 2. Зависимость вероятности перехода системы во второе работоспособное состояние $P_{10}(t)$ со временем ее эксплуатации Fig. 2. The dependence of the transition probability of the system shall operate in the second state $P_{10}(t)$ with time of exploitation

Полученная финишная вероятность нахождения системы во втором работоспособном состоянии является асимптотой функции $P_{10}(t)$ а ее значение, которое равняется \mathcal{K}_{10} наблюдается при устоявшемся режиме эксплуатации системы и является важным параметром ее безотказной работы.

Кроме того вероятность работоспособного состояния $P_{10}(t)$ пассивно резервируемой системы характеризует запас возможностей выполнять функции по назначению не смотря на отказ основного элемента, или также указывает на расширение срока эксплуатации при дополнительном регулировании (натяжение, уменьшении зазору и тому подобное). Под запасом в продолжении ра-

боты деталей, узлов и машин в целом следует понимать и возможность перетачивания рабочих органов при затупленные или переворачивание рабочего элемента на новую (не изношенную) грань и так далее.

В этом плане важное значение приобретает показатель надежности пассивно резервируемой системы связан с ее долговечностью. Таким показателем, который оценивает продолжение срока эксплуатации за счет введения в систему избыточности в виде резерва может быть среднее время нахождения системы во втором работоспособном состоянии t_{10} .

Предметно к проводимому исследованию можно записать, что среднее время нахождения системы во втором работоспособном состоянии равняется:

$$t_{10} = \int_{t_1}^{t_2} P_{10}(t) dt. \quad (11)$$

Интервал времени $t_2 - t_1$ на котором определяется средняя наработка на отказ должен принадлежать периоду работы системы когда ее начальное приработка завершилось и начался этап работы с естественным присутствием постепенного накопления повреждений (старение). Тогда запишем:

$$t_{10}(t) = \int_{t_1}^{t_2} [\mathcal{K}_{10} + D_{10} \exp(-S_4 t) + E_{10} \exp(-S_5 t)] dt.$$

Представленное выражение распишем в виде соответствующей суммы интегралов:

$$t_{10}(t) = \mathcal{K}_{10} \int_{t_1}^{t_2} dt + D_{10} \int_{t_1}^{t_2} \exp(-S_4 t) dt + E_{10} \int_{t_1}^{t_2} \exp(-S_5 t) dt.$$

Откуда имеем:

$$t_{10} = \mathcal{K}_{10} t \Big|_{t_1}^{t_2} + D_{10} \left(-\frac{1}{S_4} \right) e^{-S_4 t} \Big|_{t_1}^{t_2} + E_{10} \left(-\frac{1}{S_5} \right) e^{-S_5 t} \Big|_{t_1}^{t_2}. \quad (12)$$

Анализ зависимости изменения среднего времени нахождения системы во втором работоспособном состоянии усложнен отсутствием данных о λ, μ – характеристики переходов системы. Однако предыдущий качественный анализ полученного результата возможен путем дифференциации вклада каждой из трех составляющих уравнения (12) в

общий баланс среднего времени t_{10} . С учетом условий изложенных при анализе вероятности $P_{10}(t)$, для постоянных величин и корней уравнений, графически наиболее вероятностные изменения в составляющих и общая сумма времени t_{10} представлены на рис. 3.

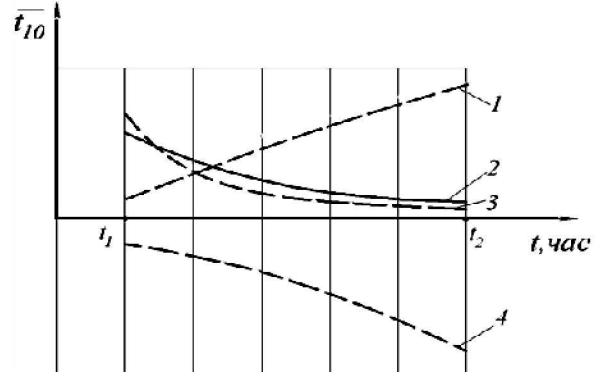


Рис. 3. Зависимость влияния времени эксплуатации пассивно дублированной системы на среднюю наработку ее во втором работоспособном состоянии:

- 1 – первая составляющая уравнения (10);
- 2 – среднее время нахождения системы в состоянии "10";
- 3 – вторая составляющая уравнения (10);
- 4 – третья составляющая уравнения (10)

Fig. 3. Dependence of the effects of time exploitation system passively duplicated on the average operating time it shall operate in the second state:

- 1 – first constituent equation (10);
- 2 – average time of finding the system in a state of "10";
- 3 – the second constituent of equation (10);
- 4 – the third constituent of equation (10)

ВЫВОДЫ

Вероятностные характеристики состояний и переходов системы из состояния в состояние при активном резервировании с учетом динамики изменений при старении техники можно определить решая полученную матрицу. Она является основной в описании поведения системы. Установление вероятностей состояний даст возможность выявления основных критериев надежности активно дублированной системы. При этом возможное установление степени повышения надежности системы в условиях ее старения и выявления влияния изменения структуры системы на ее надежность.

Определение вероятностных характеристик активно дублированной системы является предметом дальнейших исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Boyko A.I., Bondarenko O.V., Savchenko V.M. 2013. Matematichna formalizatsiya opisu staniv i perehodiv pasivno rezervovanih tehnicnih sistem // Visnik HNTUSG im. P. Vasilenko: Resursozberigayuchi tehnologii, materiali ta obladnannya y remontnomu virobnitstvi. – Harkiv – V. № 133. – 216-220.
2. Boyko A.I., Dumenko K.M. 2010. Doslidzhennya funktsii gotovnosti mehanichnih sistem pri nakopichuvanni poshkodzhenn // Problemi obchislyvalnoï mehaniki i mitsnosti konstruksiy: zbirnik naukovih prats DNU. – Dnipropetrovsk: Nauka i osvita – Vip. 14. – 72-78.
3. Bondarenko O. 2012. Kompleksna otsinka vikoristannya pasivnogo rezervuvannya v doslidzhennyah nadiynosti kukurudzobiralnoï tehniki // Silskogospodarski mashini: Zb. nauk. st. – Vip. 22. – Lutsk: Red.-vid. viddil LNTU. – 9-17.
4. Butenin N.V., Lusch J.L., Merkin D.R. 1985. Kurs teoreticheskoy mehaniki // M.: Nauka. – 272.
5. Voytyuk V., Demko A., Nadtochiy O., Demko S. 2003. Determination of resource recovery units // MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture – Lublin, Vol. 6. 273-280.
6. Voytyuk V., A. Demko, Demko S. 2005. yVplyv ystroktiv yekspluatatsiyi yna ymodel yzminy ypratsezdatsnosti yzernozybralnyh ykombayniv // yTehnika yAPK. - № 8. – 14-18.
7. Gulyaev 1983. Otsenka nadezhnosti kulturtehnichestkih mashin // Voprosy osvoeniya zakustarenyh i kamenistyh zemel. – Elgava. – 68-74.
8. Dumenko K. 2010. Analysis of the main factors of insufficient reliability of domestic harvesting machines // MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture – Lublin, Vol. 12A. 108-117.
9. Dumenko K., Shevchenko, K., 2012. Simulation of the reliability of combine harvesters // MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture – Lublin, Vol. 14. No. 2. 41-44.
10. Kirtbaya J.K. 1982. Rezervy v ispolzovanii mashinno-traktornogo parka // M.: Kolos. – 245.
11. Krasnichenko A.V. 1961. Spravochnik konstruktora selskohozyaystvennyh mashin // M.: Gosudarstvennoe nauchno-tehnicheskoe izdatelstvo mashinostroitel'noy literatury. – 860.
12. Nekiporenko V.I. 1977. Strukturny analiz sistem (effektivnost i nadezhnost) // M.: Sovetskoe radio – 214.
13. Pogorily L., Koval S. 2003. Zernozybralna tehnika: problemi, alternativi, prognoz // Tehnika APK. – № 7. – 4-7.
14. Skorohodov A.N. 1988. Analiz ekspluatatsionnoy nadezhnosti agregatov i tehnichestkih kompleksov // M. – 136.
15. Spirin I.V. 2003. Rezervirovanie v upravlenii hozyaystvennyimi sistemami // M.: Akademkniga – 199.
16. Tihonenko O.V. 2008. Zabezpechenist silskogo gospodarstva zernozybralnoyu tehnikoyu yak zaporuka effektivnosti zernovogo gospodarstva // Ekonomika APK. – № 7. – 36-41.
17. Ushakov I.A. 2008. Kurs teorii nadezhnosti sistem // M.: Drofa. – 239.

GRAPHIC ANALYTICAL ANALYSIS AND TRANSITIONS IN POSSIBLE BECOME ACTIVE REDUNDANT TECHNICAL SYSTEM

Summary. The results of theoretical researches are resulted for the complex estimation of the common state and tendencies of changes of reliable work of machines for collection of corn. The stochastic model of the states and transitions of subsystems is built at the passive reserving.

Key words: passive redundancy graph states, failure intensity, the intensity of restorations.