

УДК 623.4.017

Б.Н. Ланецкий, В.В. Лукьянчук

Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков

НАДЕЖНОСТЬ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С МНОГОУРОВНЕВОЙ РАБОТОСПОСОБНОСТЬЮ. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ПОЛОЖЕНИЯ

Рассматриваются основные понятия и положения теории надежности систем с многоуровневой работоспособностью. Предполагается, что система с многоуровневой работоспособностью может находиться кроме работоспособного и неработоспособного состояний, в одном из частично работоспособных состояний. Вводятся понятия показателей качества и эффективности функционирования системы с многоуровневой работоспособностью, определяются их единичные, комплексные и многоуровневые показатели надежности, представляемые в векторной и матричной форме.

Ключевые слова: сложная техническая система, многоуровневая работоспособность.

Введение

Постановка проблемы. В настоящее время при оценке показателей надежности сложных технических систем (СТС) предполагают, что система может находиться в одном из двух возможных состояний: работоспособном (РС) или неработоспособном (НРС). Считается, что если система в течение требуемого времени находилась в РС состоянии, то она выполнила все заданные функции полностью (система вида I) [1].

Однако для большинства современных СТС такую модель РС нельзя считать удовлетворительной как минимум по двум причинам. Во-первых, даже при отсутствии отказов подсистем или элементов СТС в процессе ее функционирования нельзя говорить о полном выполнении всех функций системой как о достоверном событии. Причиной этому может быть техническое несовершенство системы для решения отдельных задач, различная сложность задач и требования к характеристикам системы, различного рода помехи в процессе функционирования и др. Во-вторых, в силу имеющейся избыточности большинства СТС появление отказов отдельных элементов или изменение их параметров могут привести не к полному отказу системы, а к некоторому ухудшению качества функционирования.

Кроме того, в современных условиях важным направлением повышения экономической эффективности эксплуатации СТС, является переход на ресурсосберегающие концепции эксплуатации и ремонта, в частности, на техническую эксплуатацию по состоянию. Возможность такого перехода сдерживается отсутствием многоуровневого контроля работоспособности СТС.

В связи с этим появилась необходимость исследования изделий, которые, кроме РС и НРС состояний могут находиться в некотором числе частично РС (ЧРС) состояний (система вида II). Для

оценки надежности таких систем необходима разработка многоуровневых моделей РС и соответствующих математических моделей надежности. Однако разработка таких моделей наталкивается на определенные трудности, связанные с необходимостью определения понятия выходной эффект системы, номенклатуры показателей надежности и др.

Анализ литературы. В [2] определено, что надежность систем вида II обусловлена, в общем случае, безотказностью, ремонтпригодностью, сохраняемостью и долговечностью их составных частей, которые влияют на качество выполнения возложенных на систему задач и, следовательно, на качество функционирования системы и ее выходной эффект.

Понятия безотказность и ремонтпригодность систем вида II шире, чем для систем вида I. Так, для систем вида I отказ в [3, 4] определен как событие, заключающееся в нарушении РС состояния объекта. Для систем вида II нарушение РС может быть полным или частичным, и обусловлено соответствующим снижением уровня качества функционирования системы. Соответственно необходимо различать полные и частичные отказы системы вида II, а восстановления – полные и частичные (неполные).

Использование показателей надежности систем вида I неприемлемо для систем вида II, так как эти показатели учитывают лишь факт появления или отсутствия отказов в элементах системы и не дают представления о влиянии отказов и восстановлений на качество функционирования или конечный эффект функционирования системы.

Таким образом, показатели надежности систем вида II целесообразно определять путем сравнения показателя качества функционирования или выходного эффекта реальной и идеальной (в смысле надежности) системы, т.е. о показателе надежности систем вида II необходимо судить по степени сни-

жения (или повышения) показателя качества функционирования и выходного эффекта системы из-за отказов (или восстановлений).

Цель статьи: определение основных понятий и положений теории надежности для систем вида II.

Основная часть

Под надежностью систем вида II будем понимать свойство системы сохранять во времени в установленных пределах значения показателя качества и эффективности функционирования в заданных режимах и условиях использования.

Показатели качества и эффективности функционирования системы определяются задачами, стоящими перед СТС. Для ряда СТС характеристикой качества функционирования целесообразно считать производительность, для других — вероятность успешного выполнения определенных функций в данный момент времени. Выходной эффект системы может оцениваться вероятностью выполнения поставленной задачи в течение заданного интервала времени, вероятностью выполнения установленной программы и др.

Если известна задача СТС и определены показатели качества и эффективности ее функционирования, то каждому состоянию $e_i(t)$ системы в момент времени t можно поставить в соответствие определенное значение меры качества функционирования $a_i(t)$ системы в этом состоянии. Это значение показателя должно зависеть от состояния системы и давать количественную оценку степени приспособленности СТС к выполнению задачи в данном состоянии (мгновенная оценка качества функционирования системы).

Показателем качества функционирования системы в момент t будем считать математическое ожидание случайного процесса $a_i(t)$ по множеству его реализаций в момент t , т.е.

$$M[a_i(t)] = A_i(t). \quad (1)$$

Каждой реализации случайного процесса $a_i(t)$ функционирования системы на заданном интервале времени $t_0 \leq t \leq t_0 + \tau$ можно поставить в соответствие числовую оценку $\varphi_i[t_0, t_0 + \tau]$ этой реализации, т.е. случайную величину эффективности функционирования системы на этом интервале. Эта случайная величина является численной оценкой качества выполнения задачи в интервале времени $[t_0, t_0 + \tau]$ при условии реализации данной траектории процесса функционирования системы, т.е. представляет собой выходной эффект системы.

В качестве интервального показателя эффективности функционирования системы можно выбрать математическое ожидание выходного эффекта системы, т.е.

$$\varphi_i[t_0, t_0 + \tau] = M[\varphi\{a_i(t), t_0 \leq t \leq t_0 + \tau\}]. \quad (2)$$

При данных условиях эксплуатации значение показателя φ зависит от структуры, параметров системы и характеристик ее надежности. Будем различать показатели φ и φ_0 , A и A_0 для реальной и идеальной (в смысле надежности) системы, т.е. φ и $A(t)$ - значения показателей качества и эффективности функционирования реальной системы, вычисленные в предположении, что элементы системы могут отказывать, а φ_0 и A_0 - значения этих же показателей идеальной системы, вычисленные в предположении, что система исправна и не отказывает. Показатели надежности систем вида II можно определить как функции от φ и φ_0 (A и A_0), оценивающие степень снижения показателя φ (A) СТС из-за ненадежности ее элементов или уходов параметров при заданных режимах и условиях эксплуатации, например:

$$\Delta\varphi = \varphi_0 - \varphi, \text{ или } K_{\text{эф}} = \frac{\varphi(t_0, t_0 + \tau)}{\varphi_0(t_0, t_0 + \tau)}. \quad (3)$$

Величина $\Delta\varphi$ показывает насколько снижается показатель φ реальной системы по сравнению с показателем φ_0 идеальной системы. Величина $K_{\text{эф}}$ показывает во сколько раз снижается показатель φ реальной системы по сравнению с показателем φ_0 идеальной системы, т.е. показатель $K_{\text{эф}}$ характеризует степень влияния отказов и уходов параметров системы на эффективность использования системы по назначению [4].

Показатели $\Delta\varphi$ и $K_{\text{эф}}$ показывают только степень снижения качества и эффективности функционирования системы в результате отказов ее элементов или ухода параметров, но не дают информацию о выходном эффекте и качестве функционирования системы. Поэтому наряду с показателями $\Delta\varphi$ и $K_{\text{эф}}$ целесообразно указывать оценку качества A_0 и эффективности φ_0 функционирования идеальной системы.

Если известно значение φ_0 , то достаточно задать один из показателей $\Delta\varphi$ или $K_{\text{эф}}$. Другой показатель можно вычислить, зная величину φ_0 по следующей функциональной зависимости:

$$\Delta\varphi = (1 - K_{\text{эф}})\varphi_0. \quad (4)$$

Коэффициент сохранения эффективности, рассчитанный по формуле (3), является интервальной оценкой надежности системы в интервале времени $[t_0, t_0 + \tau]$. Другим способом получения интервальной оценки надежности систем вида II является усреднение в рассматриваемом интервале времени коэффициента $K_{\text{эф}}(t)$ [5], т.е.

$$\rho[t_0, t_0 + \tau] = \int_{t_0}^{t_0 + \tau} K_{\text{кф}}(t) dW(t). \quad (5)$$

где $W(t)$ – некоторая "весовая" функция, учитывающая "полезность" системы в зависимости от времени.

Введенные показатели качества и эффективности функционирования позволяют определить основные понятия и определения теории надежности систем вида II. Сформулируем некоторые из них.

Альфа - уровневое РС состояние - это состояние объекта, при котором обеспечивается возможность его функционирования на уровне не ниже α , т.е. $K_{\text{кф}} \geq \alpha$. Это состояние можно задать через определенные требования к значениям параметров, характеризующих способность объекта выполнять заданные функции с установленными показателями качества функционирования.

Альфа - уровневый отказ - событие, заключающееся в нарушении α -уровневого РС состояния, или событие, заключающееся в снижении уровня качества функционирования ниже величины α . Альфа - уровневый отказ может быть внезапным, постепенным, конструктивным и др.

Введем временные понятия надежности для систем вида II. Альфа - уровневая наработка - это продолжительность работы объекта на уровне качества функционирования не ниже α (т.е. с $K_{\text{кф}} \geq \alpha$) или объем работы объекта с уровнем, выходного эффекта не ниже α (т.е. с $K_{\text{эф}} \geq \alpha$). Альфа - уровневую наработку изделия, работающего непрерывно, можно измерять в единицах календарного времени. Для изделий работающих с перерывами различают непрерывную и суммарную наработку. Для некоторых объектов физическое изнашивание связано не только с календарной продолжительностью эксплуатации, но и с объемом работы объекта, и поэтому зависит от интенсивности использования объекта по назначению. Для таких объектов α -уровневую наработку можно выражать через коэффициент сохранения эффективности, характеризующий объем произведенной работы.

Нарботка до α -уровневого отказа - это наработка от начала эксплуатации, характеризуемого полностью РС состоянием, до возникновения первого α -уровневого отказа.

Нарботка между α -уровневыми отказами - это наработка объекта от окончания восстановления его РС состояния до α -уровневого отказа.

Восстановление РС объекта может быть полным, минимальным и частичным. При полном восстановлении объект переводится в ПРС состояние, при минимальном восстановлении - в состояние $\alpha_{\text{МВ}}$ -уровневого РС состояния, в котором объект находился перед возникновением $\alpha_{\text{МВ}}$ -уровневого отказа. При частичном восстановлении объект переводится в состояние α -уровневой РС, причем $\alpha_{\text{МВ}} < \alpha < 1$. Аль-

фа - уровневое восстановления – восстановление, в результате которого объект переводится на α -уровневое РС состояние. Альфа - уровневое восстановление может быть минимальным, частичным и полным. Альфа - уровневое минимальное восстановление проводится после α -уровневого отказа, а α -уровневое частичное восстановление - после β -уровневого отказа $\beta < \alpha < 1$.

Из определения наработки между α -уровневыми отказами и α -уровневого восстановления следует, что для систем вида II можно различать наработку между α -уровневыми отказами при α -уровневом минимальном восстановлении, а также наработку между α -уровневыми отказами при α -уровневом частичном восстановлении.

Введенные понятия позволяют установить следующие показатели безотказности: вероятность $P_{\alpha}(t_0, t_0 + \tau)$ α -уровневого функционирования в течение заданного времени, средняя наработка $T_{\text{ср}\alpha}$ до α -уровневого отказа, средняя наработка $T_{\text{ср}\alpha}$ на α -уровневый отказ, интенсивность α -уровневых отказов и др.

Сформулируем определения этих показателей.

Вероятность $P_{\alpha}(t_0, t_0 + \tau)$ α -уровневого функционирования в течение заданного времени - это вероятность того, что система в течение заданного времени будет функционировать на уровне качества функционирования не ниже α .

Средняя наработка $T_{\alpha}(t_0, t_0 + \tau)$ на α -уровневый отказ - это среднее время функционирования системы в течение заданного интервала времени на уровнях качества функционирования не ниже α , т.е. с $K_{\text{кф}} \geq \alpha$.

Средняя наработка T_{α}^1 до α -уровневого отказа – среднее время функционирования системы до первого снижения уровня качества функционирования ниже величины α .

Интенсивность α -уровневых отказов λ_{α} - это условная плотность вероятности возникновения α -уровневого отказа, определяемая при условии, что до рассматриваемого времени этот отказ не возник.

Вероятность α -уровневого восстановления при β -уровневом отказе $P_{\text{в}\alpha, \beta}(t_0, t_0 + \tau)$ - это вероятность того, что время α -уровневого восстановления после β -уровневого отказа не превысит заданного значения.

Среднее время (α, β) -уровневого восстановления $T_{\text{в}\alpha, \beta}$ – это математическое ожидание времени α -уровневого восстановления объекта после β -уровневого отказа.

Сформулируем определения комплексных показателей надежности для систем вида II.

Альфа - уровневый коэффициент готовности $K_{\text{га}}(t)$ – вероятность того, что система в произвольный момент времени будет находиться в α -уровневом РС состоянии.

Вероятность $Q_\alpha(t_0, t_0 + \tau)$ α -уровневого выходного эффекта – это вероятность того, что выходной эффект от использования системы в заданном интервале времени $[t_0, t_0 + \tau]$ будет не ниже величины α по сравнению с выходным эффектом полностью РС системы.

Показатель $Q_\alpha(t_0, t_0 + \tau)$ является комплексным показателем надежности для восстанавливаемых систем и показателем безотказности для невосстанавливаемых систем.

Кроме введенных показателей надежности для систем вида II можно использовать многоуровневые показатели надежности, определяемые как совокупность вероятностных характеристик заданного уровня качества или эффективности функционирования системы, построенных для различных значений $\vec{\alpha} = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$ коэффициента сохранения эффективности или коэффициента качества функционирования: показатели надежности, определяемые как совокупность средних времен функционирования системы на уровне $\vec{\alpha}$, либо совокупность средних времен до первого снижения уровня функционирования ниже установленного $\vec{\alpha}$, а также показатели надежности, определяемые как совокупность средних времен восстановления РС системы до уровня $\vec{\alpha}$ после β -уровневого отказа и др.

Эти показатели надежности можно представить в векторной и матричной форме. Они отроятся как наборы перечисленных показателей для различных значений $\vec{\alpha}$, либо $\vec{\alpha}$ и $\vec{\beta}$, например:

$$\vec{K}_{\Gamma\alpha}(t) = \{K_{\Gamma\alpha 1}(t), K_{\Gamma\alpha 2}(t), \dots, K_{\Gamma\alpha n}(t)\};$$

$$\vec{Q}_\alpha(t_0, t_0 + \tau); \vec{T}_\alpha^1; \vec{T}_\alpha(t_0, t_0 + \tau); \|\vec{T}_{\Gamma\alpha, \beta}\|. \quad (6)$$

НАДІЙНІСТЬ СКЛАДНИХ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ С БАГАТОРІВНЕВОЮ ПРАЦЕЗДАТНІСТЮ. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ТА ПОЛОЖЕННЯ

Б.М. Ланецький, В.В. Лук'янчук

Розглядаються основні поняття та положення теорії надійності систем з багаторівневою працездатністю. Передбачається, що система з багаторівневою працездатністю може знаходитися крім працездатного та непрацездатного стану, в одному з частково працездатних станів. Вводяться поняття показників якості та ефективності функціонування системи з багаторівневою працездатністю, визначаються їхні одиничні, комплексні та багаторівневі показники надійності, які уявляються в векторній і матричній формі.

Ключеві слова: складна технічна система, багаторівнева працездатність.

RELIABILITY OF COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS WITH MULTILEVEL SERVICEABILITY. BASIC TERMS AND CONCEPTS

B.N. Lanetskij, V.V. Lukjanchuk

Basic terms and concepts of the reliability theory of the systems are examined that are characterized by multilevel serviceability. It is assumed that the system with multilevel serviceability besides the serviceable and faulty states can be in one of the partially serviceable ones. The concepts of quality indices and functioning efficiency are introduced for the system with multilevel serviceability. For such systems, their separate, complex and multilevel reliability indices, presented in a vectors and matrix form, are determined.

Keywords: complex technical system, multilevel serviceability.

Выводы

Таким образом, предложены основные понятия и определения показателей надежности для сложных технических с многоуровневой работоспособностью, т.е. систем вида II. Для исследования этих систем введены три типа показателей надежности: скалярные (коэффициент качества функционирования, коэффициент сохранения эффективности); α -уровневые показатели безотказности и ремонтпригодности (векторная форма) и совокупность показателей, задаваемых для различных значений уровней работоспособности (матричная форма).

Список литературы

1. ГОСТ 27.003-90. Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности.
2. Ушаков И.А. Эффективность функционирования сложных систем / И.А. Ушаков // В сб.: 0 надежности сложных технических систем. – М.: Сов. радио, 1966. – 472 с.
3. Лубков Н.В. Анализ надежности сложных технических систем с использованием многоуровневых моделей работоспособности / Н.В. Лубков. – М.: Знание, 1988, – 63с.
4. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения.
5. Надежность технических систем: Справочник / Ю.К. Беляев, В.А. Богатырев, В.В. Болотин и др.; под ред. И.А. Ушакова. – М.: Радио и связь, 1985. – 608 с.
6. Дружинин Г.В. Надежность автоматизированных производственных систем / Г.В. Дружинин. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 480 с.

Поступила в редколлегию 23.04.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Б.А. Демидов, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожадуба, Харьков.