

УДК 519.873

Г.Ф. КРИВУЛЯ, А.С. ШКИЛЬ

Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Украина

АНАЛИЗ ВЗАИМОСВЯЗИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГОТОВНОСТИ МОНОЭРГАТИЧЕСКОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ СИСТЕМЫ И КОМПЕТЕНТНОСТИ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ

Рассматриваются интегральные характеристики надежности моноэргатехнической компьютерной системы, одним из основных компонентов которой является человек-оператор. Получены математические модели и аналитические зависимости коэффициента готовности восстанавливаемой системы от численных значений уровня функциональной готовности пользователя технической системы. Полученные зависимости позволяют определить необходимые затраты на повышение уровня обученности оператора в зависимости от состояния его текущей компетентности как пользователя технической системы.

Ключевые слова: компьютерная система, коэффициент готовности, компетентность пользователя.

Введение

Возникновение сложноорганизованных эргатехнических систем (ЭТС) связано со стремительным развитием компьютерных информационных технологий и необходимостью работы операторов с интерфейсами управления современными техническими комплексами, такими как объекты космической и авиационной техники, энергетическими предприятиями, системами управления технологическими процессами, сетями интернет и т. д. ЭТС нашли своё применение на тех объектах, где вмешательство оператора в работу объекта является на сегодняшний день необходимым условием обеспечения надежной работы данных объектов.

В большинстве случаев ЭТС представляет собой сложную компьютеризованную систему управления (КСУ), одним из основных компонентов которой является человек-оператор или группа операторов, и в зависимости от числа лиц оперативного персонала различают моноэргатические (один оператор) и полиэргатические (несколько человек) в системе. По соподчиненности операторов ЭТС могут быть первого, второго и более высоких порядков. Например, система второго порядка имеет два уровня управления, на первом из которых оператор работает с техническим устройством, а на втором – оператор кроме работы с техническим устройством осуществляет руководство действиями первого оператора [1].

Исследования, связанные с развитием и совершенствованием ЭТС, могут быть описаны тремя этапами. На первом этапе целью совершенствования ЭТС была адаптация человека к техническому уст-

ройству, на втором – технического устройства к человеку: его психологическим, физиологическим, антропометрическим и другим характеристикам. Для третьего этапа характерным является анализ человеческих факторов оператора совместно с характеристиками технического объекта как совокупных интегральных качеств ЭТС. При этом человек рассматривается как рядовое звено, включенное в техническую систему; а техническое устройство – как средство, включенное в деятельность человека-оператора. Именно человек порождает и реализует цели функционирования ЭТС с помощью технического устройства [2].

Обязательными компонентами ЭТС кроме оперативного персонала, участвующих в управлении, являются технические и программные компьютерные средства. Эффективность функционирования ЭТС существенно зависит от надёжности (работоспособности) всех трёх его компонент. При этом важнейшей задачей является обеспечение их бесперебойного функционирования в период эксплуатации. Эта задача имеет три основных составляющих – надёжность ЭТС, готовность к использованию системы и качественные характеристики обслуживания, в частности, уровень диагностического обеспечения. Все эти три составляющих предполагают диагностирование и устранение возможных неисправностей системы, порождаемыми отказами и сбоями в ее работе.

1. Постановка задачи

Надёжность технических компьютерных средств изучена достаточно всесторонне и глубоко.

Менее изучена надёжность сложных программных комплексов, а надёжностные свойства операторов ЭТС, оценка их работоспособности в настоящее время изучены недостаточно.

Человек-оператор является основным звеном современных ЭТС, статистика свидетельствует, что 20-30% аварий и катастроф прямо или косвенно связаны с ошибками человека. Следовательно, общая оценка надежности технических систем и их интегральных характеристик должны обязательно включать анализ человеческого фактора.

В связи с этим актуальной задачей является разработка методов оценки интегральных качеств ЭТС с учетом свойств всех трех компонентов системы - оперативного персонала, технических средств и программного обеспечения. В качестве основной интегральной характеристики ЭТС предлагается использовать коэффициенты готовности восстанавливаемой технической системы с учетом готовности оператора на основе его компетентности.

2. Надежность работы ЭТС с учетом деятельности человека-оператора

Системный подход к оценке надежности ЭТС предусматривает оценку человека как одного из основных компонентов системы. В общем случае данная надежность определяется как необходимость успешного выполнения поставленной задачи на заданном этапе функционирования системы в течение заданного интервала времени при определенных требованиях к продолжительности выполнения работы.

Оценка надежности ЭТС при этом основана на следующих допущениях:

- как отказы техники, так и ошибки оператора являются редкими, случайными и независимыми событиями;

- появление более одного однотипного события за время работы системы от практически невозможно;

- способности оператора к компенсации ошибок и к безошибочной работе - независимые свойства оператора.

Ошибка (отказ) человека-оператора определяется как невыполнение поставленной задачи (или выполнение запрещенного действия), которое может привести к нарушению нормального хода запланированных операций.

Ошибки оператора можно разделить на три большие группы:

- поставленная цель решения задачи не может быть достигнута из-за ошибочных действий оператора;

- оператор стремится к достижению ошибочно поставленной цели;

- оператор бездействует в тот момент, когда его участие необходимо.

Для оценки деятельности оператора используют критерии быстродействия и надежности [3].

Критерием быстродействия является время решения задачи, т.е. время от момента реагирования оператора на сигнал до момента окончания управляющих воздействий:

$$T_{\text{оп}} = a + bN = a + N/V_{\text{оп}},$$

где a - скрытое время реакции, т.е. промежуток времени от момента появления сигнала до реакции на него оператора (0,2...0,5 с); b - время переработки одной единицы информации (0,15-0,35 мин.); N - количество перерабатываемой информации; $V_{\text{оп}}$ (2.4 ед/с), или пропускная способность, характеризующая время, в течение которого оператор постигает смысл информации.

Надежность оператора характеризуется его безошибочностью, готовностью, точностью, восстанавливаемостью и своевременностью. Для каждого из этих показателей можно разработать соответствующие аналитические зависимости.

Рассмотрим случай, когда компенсация ошибок оператора и отказов техники невозможна [2]. Если отказ техники и ошибка оператора - независимые события, то вероятность безотказной работы равна:

$$P(t_0, t) = P_t(t_0, t)P_0(t),$$

где $P_t(t_0, t)$ - вероятность безотказной работы технических средств в течение времени $t_0, t_0 + t$; $P_0(t)$ - вероятность безошибочной работы оператора в течение времени t при условии, что техника работает безотказно, t_0 - общее время эксплуатации системы, t - текущий период работы системы.

ЭТС с некомпенсируемыми ошибками операторов и отказами техники сравнительно редко встречаются на практике. Надежность таких систем может быть повышена резервированием операторов с периодическим диагностированием результатов их деятельности.

Более широко распространены технические системы с восстановлением последствий отказов и компенсацией ошибок операторов. Операторы могут своевременно исправлять (компенсировать) часть допущенных ими ошибок. Компенсация ошибок является важным дополнительным путем повышения надежности ЭТС.

Введение в технические системы приспособлений, облегчающих исправление ошибки, существенно повышает надежность ЭТС.

Система с компенсацией ошибок и отказов будет безотказно работать в течение заданного времени $t_0, t_0 + t$ при следующих условиях:

- техническая система не отказывала и оператор не совершал ошибки;
- техническая система не отказывала, оператор совершил ошибку, но исправил (компенсировал) ее;
- оператор не совершил ошибки, техническая система отказывала, но благодаря вмешательству оператора система выполняла свои функции;
- оператор совершил ошибку, но исправил (компенсировал) ее, техническая система отказывала, но благодаря вмешательству оператора системы «человек и техника» выполняла свои функции.

3. Коэффициент готовности восстанавливаемой системы

Для приближенного вычисления показателей надежности восстанавливаемых ЭТС принимаем следующие допущения. Рассматривается совокупность потоков, происходящих в системе при отказе отдельных элементов. Проводится анализ всех ситуаций, приводящих к отказу системы в целом. В

результате вычисляются интенсивность потока событий данного типа и продолжительность пребывания системы в состоянии отказа по каждой из причин. Затем последовательно применяется процедура суперпозиции потоков тех ситуаций, каждая из которых приводит к отказу системы, или разрежения потоков для тех ситуаций, которые приводят к отказу системы при одновременной реализации. В итоге получаем результирующий поток с двумя итоговыми характеристиками: средним временем безотказной работы и средним временем восстановления системы.

При условии высокой надежности систем время безотказной работы, как правило, будет экспоненциально распределенным, поэтому этих двух показателей оказывается достаточно для оценки любых других показателей надежности [2].

Процесс функционирования восстанавливаемого объекта можно представить как последовательность чередующихся периодов работоспособности и восстановления (простоя) (рис. 1).

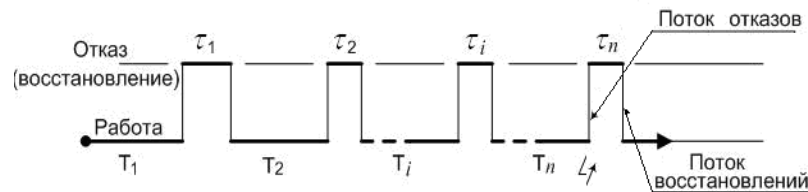


Рис. 1. Функционирование восстанавливаемого объекта, $T_1 \dots T_n$ – периоды работоспособности; $\tau_1 \dots \tau_n$ – периоды восстановления

Коэффициент готовности – это вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается. Этот показатель одновременно оценивает свойства работоспособности и ремонтпригодности объекта.

Для восстанавливаемого объекта при условии простейшего потока отказов и восстановлений коэффициент готовности равен:

$$K = \frac{T}{T + \tau} = \frac{\mu}{\lambda + \mu} = \frac{1}{1 + \frac{\lambda}{\mu}} = \frac{1}{1 + \frac{\tau}{T}} = \frac{1}{1 + \gamma} \quad (1)$$

где $\mu = \frac{1}{\tau}$, $\lambda = \frac{1}{T}$, $\gamma = \frac{\lambda}{\mu} = \frac{\tau}{T}$ – показатель восстанавливаемости.

Из выражения (1) следует, что коэффициент готовности объекта может быть повышен за счет увеличения наработки на отказ и уменьшения среднего времени восстановления.

С другой стороны коэффициент готовности за-

висит не от абсолютных значений величин T и τ , а от их отношения, т.е. от величины γ . Отметим, что для высоконадежных систем $T \gg \tau$ или $\gamma \ll 1$.

Для высоконадежных КСУ

$$0,9 < K_{\Gamma} < 0,999, \text{ т.е. } 0,9 < \frac{1}{1 + \gamma} < 0,999.$$

Иначе говоря

$$0,9(1 + \gamma) < 1 < 0,999(1 + \gamma), \\ 0,9 + 0,9\gamma < 1 < 0,999 + 0,999\gamma$$

Решая неравенство, получим:

$$0,001 < \gamma < 0,111.$$

Для практических расчетов применяется приближенные вычисления K . Для этого выполним следующие преобразования:

$$K = \frac{1 + \gamma - \gamma}{1 + \gamma} = 1 - \frac{\gamma}{1 + \gamma}.$$

Примем, что $\frac{\gamma}{1 + \gamma} \approx \gamma$, при этом погрешность преобразования будет:

$$\Delta = \left| \frac{\gamma}{1+\gamma} - \gamma \right| = \left| \frac{\gamma - \gamma - \gamma^2}{1+\gamma} \right| = \frac{\gamma^2}{1+\gamma};$$

т.к. $\gamma \ll 1, \Delta \approx \gamma^2$

Таким образом, для вычислений $K \approx 1 - \gamma$.

Коэффициент готовности является предельным значением, к которому стремится средний коэффициент готовности с ростом рассматриваемого интервала времени, т.е.

$$K = \lim_{t \rightarrow \infty} K(t),$$

где $K(t)$ – вероятность того, что в момент времени t изделие находится в работоспособном состоянии (при известных начальных условия в момент $t=0$), т.е.

$$K(t) = \frac{1}{T + \tau} \int_0^{\infty} P(t) dt,$$

$P(t)$ - вероятность безотказной работы.

Для экспоненциальных законов распределения T и τ на рис. 2 приведены графики зависимости базовых значений $K_{\Gamma}(t) = K_{\Gamma} + ke^{-(\lambda+\mu)t}$ от времени при соответствующих значениях γ .

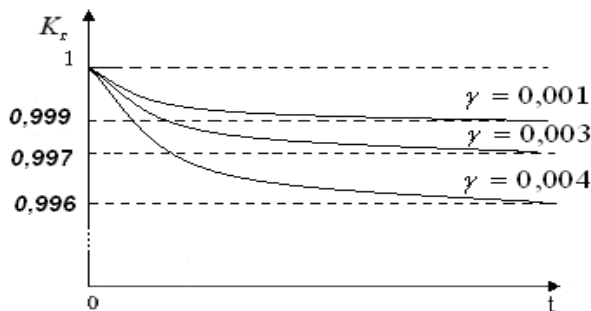


Рис. 2. Графики зависимости K_{Γ}

4. Взаимосвязь коэффициента готовности и компетентности пользователя

Высоконадежные КСУ представляют собой совокупность технических средств, средств информационного и программного обеспечения (ПО), а также оперативного персонала, объединенных для выполнения функций управления. Предполагается, что нарушение работоспособности любой из трех компонент приводит к нарушению работоспособности системы, которая должна функционировать непрерывно в течение заданного времени [3].

Для упрощения дальнейшего изложения введем следующие ограничения, которые в целом не влияют на характер вычисления коэффициента готовности:

– наработка на отказ T и время восстановления τ являются случайными величинами, подчиняющимися экспоненциальному закону распределения;

– технические параметры КСУ, определяющие значения T и τ не изменяются во времени;

– соотношение T и τ не изменяется во времени (стационарный процесс);

– квалификация (обученность) персонала влияют на изменения T и τ в равной степени.

В работе [4] предложена модель оценки деятельности человека-оператора в качестве компонента КСУ. Свойство сохранять работоспособность оператора к соответствующей функциональной деятельности при условии обучения представлена двойной экспоненциальной моделью:

$$P_3(t, \tau) = e^{-\lambda t_3} e^{-\nu \tau}, \quad (2)$$

где t_3 – необходимое для выполнения задачи время работы оператора в информационной системе, λ – интенсивность ошибок при выполнении работы, τ – время обучения, ν – интенсивность ошибок при обучении.

Следствием из (2) является формула условной интенсивности отказа (ошибки) оператора при условии предварительного обучения:

$$\Lambda(t) = P(t)\lambda(t), \quad (3)$$

где $P(t)$ – условная вероятность успешной деятельности оператора КСУ в условиях расхода накопленного в период обучения ресурса работоспособности, $\lambda(t)$ – безусловная интенсивность отказа (ошибки) оператора.

Из выражения (3) следует, что условная интенсивность отказов $\Lambda(t)$ сводится к уменьшению безусловной интенсивности отказов $\lambda(t)$ в P раз.

Применительно к системам с восстановлением, где $\lambda = \frac{1}{T}$, можно предположить, что условная наработка на отказ T_y увеличивается в P_1 раз, т.е.

$T_y = T \cdot P_1$ (реально условная наработка на отказ уменьшается, т.к. $0 \leq P_1 \leq 1$). Применив аналогичные рассуждения к интенсивности восстановлений

$\mu = \frac{1}{\tau}$, можно считать, что время восстановления

τ уменьшится в P_2 раз, т.е. $\tau_y = \frac{\tau}{P_2}$ (реально время

восстановления увеличится, т.к. в свою очередь $0 \leq P_2 \leq 1$). Исходя из предположения, что обученность оператора влияет на T и τ в равной степени, примем, что условная вероятность для них будет

одинакова, т.е. $P_1 = P_2 = P$.

Для оперативного персонала КСУ определим условный коэффициент готовности:

$$K_y = \frac{T_y}{T_y + \tau_y},$$

который может также обозначаться как K_p (от англ. operating personnel)

С учетом $T_y = T \cdot P$ и $\tau_y = \frac{\tau}{P}$, получим:

$$\begin{aligned} K_p &= \frac{T \cdot P}{T \cdot P + \frac{\tau}{P}} = \frac{T \cdot P}{\frac{T \cdot P^2 + \tau}{P}} = \frac{T \cdot P^2}{T \cdot P^2 + \tau} = \\ &= \frac{P^2}{P^2 + \frac{\tau}{T}} = \frac{P^2}{P^2 + \gamma} = \frac{1}{1 + \frac{\gamma}{P^2}}. \end{aligned} \quad (4)$$

Если принять, что $\gamma = 0,01$, получим

$$K_p = \frac{P^2}{P^2 + 0,01} = \frac{1}{1 + \frac{0,01}{P^2}}.$$

На рис.3 показан график зависимости условного коэффициента готовности K_p от условной вероятности P в интервале от 0 до 1 при $\gamma = 0,01$.

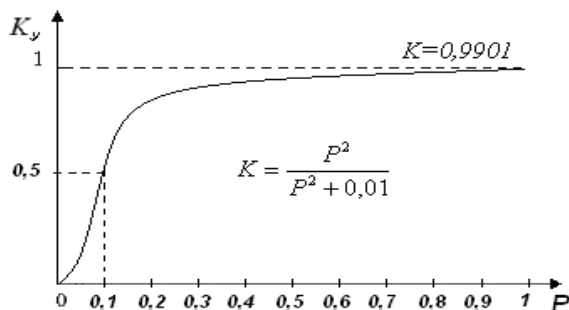


Рис. 3. График зависимости K_p

Для приближенного значения K_p определим область допустимых значений для P :

$$K = 1 - \gamma = 1 - \frac{\tau}{T} = 1 - \frac{\tau}{T \cdot P} = 1 - \frac{\tau}{T \cdot P^2} = 1 - \frac{\gamma}{P^2}. \quad (5)$$

Исходя из

$$K = 1 - \frac{\gamma}{P^2} > 0,$$

получим

$$\frac{\gamma}{P^2} < 1$$

или

$$P^2 > \gamma, \text{ т.е. } P > \sqrt{\gamma}. \quad (6)$$

Зависимость P от K_p будет

$$\gamma = (1 - K) \cdot P^2; \quad P^2 = \frac{\gamma}{1 - K}; \quad P = \sqrt{\frac{\gamma}{1 - K}},$$

что дает возможность рассчитать приращение ΔP в зависимости от ΔK :

$$P + \Delta P = \sqrt{\frac{\gamma}{1 - (K + \Delta K)}}; \quad \Delta P = \sqrt{\frac{\gamma}{1 - (K + \Delta K)}} - P. \quad (7)$$

5. Модели обученности оператора

Обученность C оператора определим как частоту правильного выполнения заданий основной деятельности (результат обучения). При этом $(C - 1)$ – частота неправильного выполнения заданий.

Тогда

$$C = \frac{R}{N},$$

где R – число правильных действий оператора в единицу времени; N – общее число действий за единицу времени.

Исходя из (2) и (3) вероятность безотказной работы равна

$$P(t) = e^{-vt},$$

где v – интенсивность ошибок оператора за время обучения t .

Если абстрагироваться от случайного характера ошибок оператора в период обучения и от продолжительности обучения t , а рассматривать только результат обучения C , то интенсивность ошибок оператора за время обучения можно заменить количеством ошибок за время обучения $(C - 1)$:

$$P = e^{-(1-C)} = e^{(C-1)}. \quad (8)$$

Для перехода от условной вероятности P к обученности C выполним логарифмирование: $\ln P = C - 1$; $C = \ln P + 1$.

Определим область допустимых значений для P , исходя из:

$$\begin{aligned} 0 \leq C \leq 1: \quad 0 \leq \ln P + 1 \leq 1; \\ -1 \leq \ln P \leq 0, \end{aligned} \quad (9)$$

$$e^{-1} \leq P \leq e^0, \quad 0,368 \leq P \leq 1.$$

Таким образом, при $\gamma = 0,01$ диапазон изменения K_p будет

$$0,932 \leq K_p \leq 0,9901.$$

На основании сопоставления (6) и (9) можно сделать вывод, что для вычисления условного коэффициента готовности персонала K_p достаточно только приближенной формулы (5).

Рассмотрим предельные случаи. При макси-

мальном уровне обученности $C=1$, $P=e^0=1$, а K_p равно максимальному значению безусловного коэффициента готовности, что соответствует объективному характеру процесса обучения.

При минимальном уровне обученности $C=0$, $P=e^{0-1}=e^{-1}=0,37$, а $K_p=0,932$. Такое значение минимального K_p связано с тем, что двухуровневая экспоненциальная модель учитывает иные факторы, кроме обученности персонала, например, время обучения, способы восстановления работоспособности персонала и др.

На рис. 4 приведена зависимость условного коэффициента готовности K_p от уровня обученности персонала C при $\gamma=0,01$.

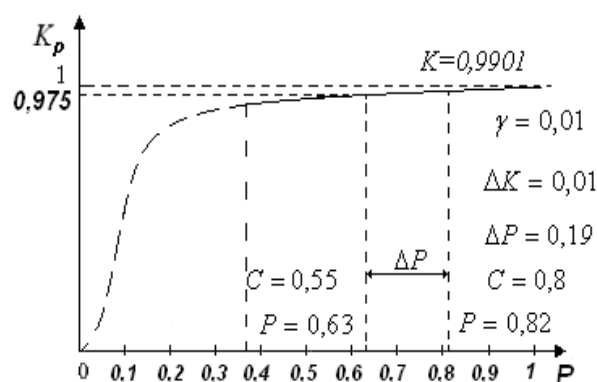


Рис. 4. График зависимости K_p от P

Покажем пример расчета уровня обученности персонала при изменениях коэффициента готовности.

Пусть имеется КСУ с показателем восстанавливаемости $\gamma=0,01$.

Результаты анализа уровня квалификации персонала показали, что уровень обученности (компетентности) равен $C=0,55$. Определить, на сколько должна повысится обученность персонала для того, чтобы условный коэффициент готовности персонала K_p повысился на $0,01$ ($\Delta K_p=0,01$).

Используя уравнение (7) $P=e^{(C-1)}$, рассчитаем условную вероятность $P=e^{0,55-1}=e^{-0,45}=0,63$, а по ней условный коэффициент готовности.

На основе (6) рассчитаем

$$\Delta P = \sqrt{\frac{0,01}{1-(0,975+0,01)}} - 0,63 = 0,19.$$

При обратном переходе к показателю обученности (компетентности) C на основе $C=\ln P+1$ получим:

$$C = \ln 0,82 + 1 = 0,801.$$

Таким образом, условный коэффициент готовности или коэффициент готовности персонала может быть увеличен за счет повышения обученности (компетентности) персонала C , на $\Delta K=0,01$ при условии $\Delta P=0,19$, а уровень компетентности при этом должен быть повышен до $C=0,8$ (т.е. $\Delta C=0,25$).

Для оценки компетентности пользователя ЭТС можно использовать методику, приведенную в [5].

Выводы

Анализ интегральных характеристик надежности моноэргатехнической компьютерной системы показал, что готовность восстанавливаемой системы существенно зависит от уровня функциональной готовности пользователя технической системы, которая определяется его обученностью (компетентностью) как оператора.

Полученные математические модели и аналитические зависимости коэффициента готовности системы от численных значений компетентности пользователя позволяют определить необходимые затраты на повышение уровня обученности оператора в зависимости от состояния его текущей компетентности.

Литература

1. Надежность технических систем : справочник [Текст] / Ю.К. Беляев, В.А. Богатырев, В.В. Болотин и др.; под ред. И.А. Ушакова. – М.: Радио и связь, 1985. – 608 с.
2. Телекоммуникационная инфраструктура центров обработки данных [Электронный ресурс] / Документ SP-3-0092: (Стандарт ТИА-942, ред. 7.0, февраль 2005). – Режим доступа: http://www.ups-info.ru/etc/tia_russkii.pdf. – 15.06.2011 г.
3. Смагин, В.А. Вероятностные модели элементов сложных систем [Текст] / В.А. Смагин. – СПб.: Военно-инженерный космический университет, 2003. – Вып. 1. – 66 с.
4. Смагин, В.А. Модель надежности живого организма (оператора). [Электронный ресурс] / В.А. Смагин. – Режим доступа: <http://sir35.narod.ru/Smagin/index.htm#Beg> – 10.12.2010 г.
5. Диагностика компетентности пользователей компьютерных систем [Текст] / Г.Ф. Кривуля, А.С. Шкиль, Д.Е. Кучеренко, Е.В. Гаркуша // АСУ и приборы автоматики. – 2010. – Вып. 150. – С. 125–133.

Поступила в редакцію 22.02.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Г.И. Загарий, Харьковская государственная академия железнодорожного транспорта, Украина.

АНАЛІЗ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКУ ІНТЕГРАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГОТОВНОСТІ МОНОЕРГАТИЧНОЇ КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМИ І КОМПЕТЕНТНОСТІ КОРИСТУВАЧА

Г.Ф. Кривуля , О.С. Шкіль

Розглядаються інтегральні характеристики надійності моноергатичної комп'ютерної системи, одним з основних компонентів якої є людина-оператор. Отримані математичні моделі і аналітичні залежності коефіцієнта готовності відновлюваної системи від чисельних значень рівня функціональної готовності користувача технічної системи. Отримані залежності дозволяють визначити необхідні витрати на підвищення рівня навченості оператора залежно від стану його поточної компетентності як користувача технічної системи.

Ключові слова: комп'ютерна система, коефіцієнт готовності, компетентність користувача

ANALYSIS OF INTERCOMMUNICATION OF INTEGRAL DESCRIPTIONS OF READINESS AND USER'S COMPETENCE FOR MONOERGATIC COMPUTER SYSTEM

G.F. Krivoulya, A.S. Shkil

Integral descriptions of reliability for the monoergatic computer system are examined, one of basic components of that is a man-operator. Mathematical models and analytical dependences of readiness coefficient for the refurbishable system are received from the numeral values of the level of the user's competence as an user of the technical system. The obtained dependences allow to define necessary expense on the increase of level of the operator's training, depending on the state of his/her competence as an user of the technical system.

Keywords: computer system, readiness coefficient, user competence

Кривуля Геннадій Федорович – д-р техн. наук, проф. кафедри АПВТ, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Украина, e-mail: krivoulya@i.ua.

Шкіль Александр Сергеевич – канд. техн. наук, доцент кафедри АПВТ, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Украина, e-mail: shkil@opentest.com.ua.