

УДК 62–192

В.С. МАРЮХНЕНКО

Иркутский Государственный университет путей сообщения, Россия

АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ СЛОЖНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ С ГРУППАМИ ОТКАЗОВ РАЗЛИЧНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

Предложена, на аксиоматической основе, комплексная форма представления показателей надежности невосстанавливаемых информационных управляющих систем с независимыми отказами различного происхождения, которые разделены на две группы в зависимости от их причин. Приведены аксиомы и терминология описания показателей надежности в комплексной форме. Рассмотрены комплексные формы показателей надежности, а именно, интенсивности отказов, вероятности безотказной работы, вероятности отказа, для сложных систем без резервирования и с резервированием замещением.

Ключевые слова: *вероятность безотказной работы, вероятность отказа, интенсивность отказов, надежность, управляющая система.*

Введение

На транспорте и в промышленности существует широкий класс объектов, которые требуют высокой эффективности управления. К ним относятся промышленные робототехнические системы, технологические процессы, управляемые подвижные объекты транспорта. Управление перечисленными объектами осуществляется информационными управляющими системами (ИУС). Эффективность управления такими объектами во многом определяется надежностью ИУС.

В [1] приведены различные подходы к классификации отказов, которые, впрочем, основываются, прежде всего, на физическом соответствии изделия требованиям нормативно-технической документации. Между тем, всё множество учтённых отказов ИУС конкретного типа можно разделить на пары групп, каждая из которых обладает своими отличительными особенностями. Такими группами могут быть: аппаратные и информационные отказы [2]; отказы по причине конструктивно-производственных недостатков и отказы из-за нарушений правил эксплуатации [3]; отказы, связанные и не связанные с воздействиями внешней среды [4, 5]; отказы цифровой (микропроцессорной) и непрерывной части ИУС [6].

Отличия отказов ИУС, разделяющихся по определенному признаку на две группы, требуют, с одной стороны, отдельного их учета и анализа, и сохранения сведений о показателях надежности по всем отказам в целом, – с другой. Это необходимо для выработки конструктивных, производственных и эксплуатационных мер по повышению надежно-

сти и предупреждению отказов, а также для обоснования выбора ИУС конкретного применения.

Целью статьи является обоснование возможности применения теории комплексных чисел для анализа показателей надежности информационно-управляющих систем с отказами, попарно разделяющимися на группы.

1. Аксиоматика и терминология

Комплексные числа (или комплексные функции времени) в теорию надежности предлагается ввести на основе аксиом.

Аксиома 1. Если для показателя надежности $z(t)$ известны функции $z_A(t)$ и $z_B(t)$ по группам отказов А и Б, то комплексная форма этого показателя записывается в виде

$$\hat{z}(t) = v[z_A(t) + jz_B(t)], \quad (1)$$

где v – нормирующий множитель, необходимый для приведения показателей надежности к значениям, удобным и корректным с точки зрения практического применения;

j – мнимая единица.

Аксиома 2. Если $z_A(t)$ и $z_B(t)$ в показателе надежности (1) имеют смысл вероятности, то для модуля комплексной функции времени (1) справедливы выражения

$$|\hat{z}(t)| \begin{cases} \leq 1 & \text{при } z_A(t) \neq 0, \text{ и } z_B(t) \neq 0; \\ = 0 & \text{при } z_A(t) = 0, \text{ и } z_B(t) \neq 0; \\ = 0 & \text{при } z_A(t) \neq 0, \text{ и } z_B(t) = 0. \end{cases} \quad (2)$$

В настоящее время широко используется в учебной и специальной литературе стандартизованный [1] термин «комплексные показатели на-

дежности». Показатели, объединенные под этим названием, являются действительными числами или функциями времени. Для устранения терминологической неоднозначности показатели надежности ИУС, представленные в комплексном виде (1), здесь предлагается называть обобщенными показателями: обобщенная интенсивность отказов, обобщенная вероятность безотказной работы, обобщенная вероятность отказа, обобщенная наработка до отказа (на отказ), обобщенный коэффициент готовности и т.п.

2. Обобщенная интенсивность отказов

Пусть произведено раздельное определение (в общем случае как функций времени) интенсивностей $\lambda_A(t)$ и $\lambda_B(t)$ независимых отказов по группам А и Б. Согласно (1) выражение для обобщенной интенсивности отказов $\hat{\lambda}(t)$ имеет вид

$$\hat{\lambda}(t) = v_\lambda [\lambda_A(t) + j\lambda_B(t)] = \lambda(t)e^{j\phi_\lambda(t)}, \quad (3)$$

где $\lambda(t)$ и $\phi_\lambda(t)$ – соответственно модуль и аргумент обобщенной интенсивности отказов

$$\lambda(t) = v_\lambda \sqrt{\lambda_A^2(t) + \lambda_B^2(t)}; \quad (4)$$

$$\phi_\lambda(t) = \arctg[\lambda_B(t)/\lambda_A(t)], \quad (5)$$

$I_{AB}(t)$ – отношение интенсивностей отказов:

$$I(t) = [\lambda_B(t)/\lambda_A(t)]; \quad (6)$$

v_λ – нормирующий множитель обобщенной интенсивности отказов.

Критериями выбора множителя v_λ являются практические потребности и удобство формул:

а) если

$$v_\lambda = \frac{\lambda_A(t) + \lambda_B(t)}{\sqrt{\lambda_A^2(t) + \lambda_B^2(t)}}, \quad (7)$$

то $\lambda(t) = \lambda_A(t) + \lambda_B(t)$; (8)

б) при $\lambda_A(t) \approx \lambda_B(t)$ удобно принять $v_\lambda = 1/\sqrt{2}$;

в) в случае выбора $v_\lambda=1$ проекциями вектора обобщенной интенсивности отказов на действительную и мнимую оси являются соответственно интенсивности отказов $\lambda_A(t)$ и $\lambda_B(t)$.

Так как $\lambda_A(t) > 0$ и $\lambda_B(t) > 0$, то из (3) следуют свойства обобщенной интенсивности отказов: вектор $\hat{\lambda}(t)$, $t \in [0; \infty[$, располагается только в первом квадранте; изменение хотя бы одной из составляющих вектора $\hat{\lambda}(t)$ приводит одновременно к изменению его модуля, и к повороту по или против хода стрелки часов в зависимости от отношения (6).

Изменения интенсивностей отказов по группам отказов А и Б (рис. 1) соответствуют периодам эксплуатации: приработки и испытаний (I), основной эксплуатации (II) и старения (III) [5]. Годограф век-

тора $\hat{\lambda}(t)$ отражает изменения его действительной $\lambda_A(t)$ и мнимой $j\lambda_B(t)$ составляющих (рис. 2). При $v_\lambda=1$ годограф описывается системой уравнений

$$\begin{cases} \text{Re} [\hat{\lambda}(t)] = \lambda_A(t); \\ \text{Im} [\hat{\lambda}(t)] = \lambda_B(t). \end{cases} \quad (9)$$

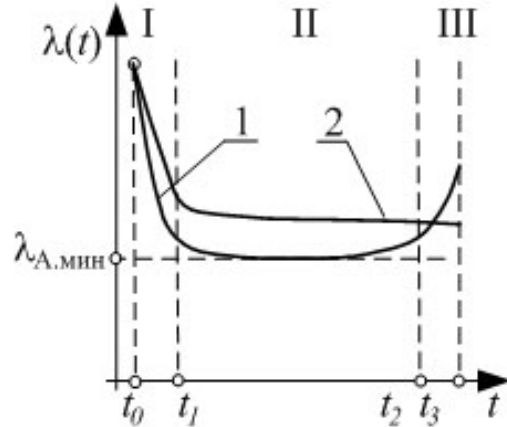


Рис. 1. Зависимости интенсивностей отказов от времени эксплуатации ИУС: 1 – по группе отказов А; 2 – по группе отказов Б

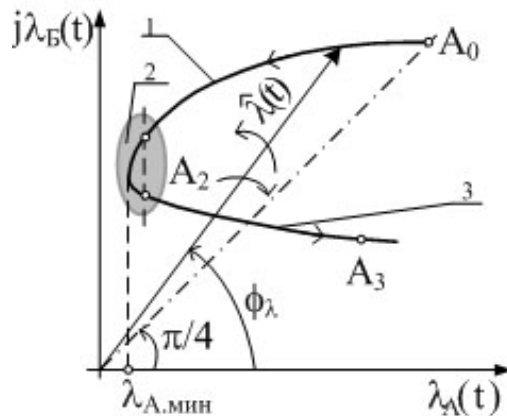


Рис. 2. Годограф вектора обобщенной интенсивности отказов: 1 – период приработки и испытаний; 2 – период основной эксплуатации; 3 – период старения

Он начинается в точке A_0 , что соответствует началу эксплуатации $t=t_0$. Интервал между точками A_0 и A_1 соответствует времени приработки и испытаний, а между точками A_1 и A_2 – основной времени эксплуатации $t \in [t_1; t_2]$. Часть годографа после точки A_2 – период старения. Точка A_3 – положение конца вектора $\hat{\lambda}(t)$ в момент снятия ИУС с эксплуатации ($t=t_3$).

Форма годографа и кривизна его ветвей позволяют судить о различиях и неравномерностях интенсивностей отказов по группам А и Б на различных этапах эксплуатации ИУС.

3. Обобщенные вероятности безотказной работы и отказа

Обобщенная вероятность безотказной работы ИУС согласно (1):

$$\hat{p}(t) = v_p [p_A(t) + j p_B(t)] = p(t) e^{j\phi_p(t)}, \quad (10)$$

где $v_p = 1/\sqrt{2}$ – нормирующий множитель, удовлетворяющий (2);

$p_A(t)$ и $p_B(t)$ – вероятности безотказной работы ИУС по группам отказов А и Б соответственно:

$$p_A(t) = \exp\left\{-\int_0^t \lambda_A(t) dt\right\};$$

$$p_B(t) = \exp\left\{-\int_0^t \lambda_B(t) dt\right\}; \quad (11)$$

$p(t)$ и $\phi_p(t)$ – модуль и аргумент обобщенной вероятности безотказной работы:

$$p(t) = |\hat{p}(t)| = v_p \sqrt{p_A^2(t) + p_B^2(t)}; \quad (12)$$

$$\phi_p(t) = \arctg[(p_B(t)/p_A(t)] = \arctg\{e^{\Lambda(t)}\}, \quad (13)$$

где

$$\Lambda(t) = \int_0^t [\lambda_B(t) - \lambda_A(t)] dt. \quad (14)$$

Проекциями вектора $\hat{p}(t)$ на координатные оси являются нормированные функции (рис. 4)

$$p_{Av}(t) = v_p p_A(t); \quad p_{Bv}(t) = v_p p_B(t). \quad (15)$$

Обобщенная вероятность отказа ИУС согласно аксиомам (1) и (2)

$$\hat{q}(t) = v_q [q_A(t) + j q_B(t)] = q(t) e^{j\phi_q(t)}. \quad (16)$$

где $q_A(t)$ и $q_B(t)$ – соответственно вероятности отказов по группам А и Б

$$q_A(t) = 1 - p_A(t); \quad q_B(t) = 1 - p_B(t); \quad (17)$$

где $q(t)$ и $\phi_q(t)$ – модуль и аргумент вектора $\hat{q}(t)$;

$v_q = 1/\sqrt{2}$ – нормирующий множитель.

На основании формул (16) и (17) при $v_p = v_q = v$ справедливо векторное уравнение

$$\hat{q}(t) + \hat{p}(t) = \hat{E}, \quad (18)$$

где \hat{E} – вектор на комплексной плоскости:

$$\hat{E} = v e^{j\pi/4}. \quad (19)$$

Начальные значения модулей векторов $\hat{p}(t)$ и $\hat{q}(t)$: $p(t_0)=1, q(t_0)=0$. С течением времени $p(t)$ непрерывно уменьшается, а $q(t)$ – возрастает. Предельными значениями модулей являются

$$\lim_{t \rightarrow \infty} [p(t)] = 0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} [q(t)] = 1. \quad (20)$$

Начальное значение аргумента вектора $\hat{p}(t)$ $\phi_p(t_0)=\pi/4$. С течением времени аргумент (13) воз-

растает или уменьшается в зависимости от знака $\Lambda(t)$. Предельные значения аргумента $j_p(t)$:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} [\phi_p(t)] = 0 \quad \text{при } \Lambda(t) < 0, \quad (21)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} [\phi_p(t)] = \pi/2, \quad \text{при } \Lambda(t) > 0. \quad (22)$$

Соответственно и годограф вектора $\hat{p}(t)$ начинается в точке A_0 и располагается ниже, или выше линии $j = \pi/4$ (рис. 3).

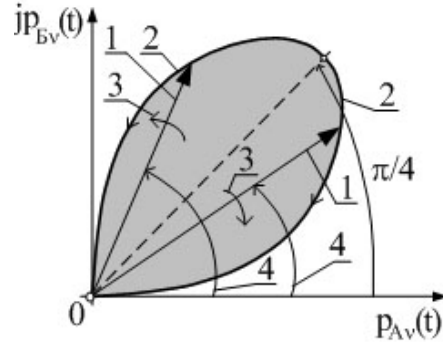


Рис. 3. Векторное представление обобщенной вероятности безотказной работы при различных отношениях $l(t)$: 1 – текущее положение векторов; 2 – годографы векторов; 3 – направление вращения векторов; 4 – аргумент $\phi_p(t)$

Начальное значение аргумента вектора $\hat{q}(t)$ в соответствии с (18) $\phi_q(t_0)=0$. С течением времени аргумент вектора вероятности отказа в зависимости от знака $\Lambda(t)$ уменьшается или возрастает противоположным образом изменению аргумента $j_p(t)$. Предельные значения аргумента $j_q(t)$:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} [\phi_q(t)] = 0 \quad \text{при } \Lambda(t) > 0, \quad (23)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} [\phi_q(t)] = \pi/2 \quad \text{при } \Lambda(t) < 0. \quad (24)$$

Выражению (18) соответствует векторная диаграмма (рис. 4), построенная для $\Lambda(t) < 0$.

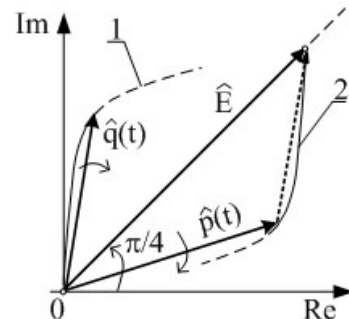


Рис.4. Векторная диаграмма вероятностных показателей надежности ИУС с двумя группами отказа: 1 – годограф обобщенной вероятности отказа; 2 – годограф обобщенной вероятности безотказной работы

Таким образом, обобщенным вероятностным показателям $\hat{p}(t)$ и $\hat{q}(t)$ характерны свойства:

- а) положение векторов в первом квадранте;
- б) ограниченность годографов точкой A_0 и началом координат; в) непрерывность изменений на интервале $t \in [t_0, \infty[$ как модулей, так и аргументов.

4. Обобщенные показатели надежности сложных ИУС

Пусть ИУС состоит из n последовательно включенных элементов, причем n_A из них имеют только отказы группы А, и n_B только отказы группы Б. Такая система приходит в состояние отказа при отказе хотя бы одного элемента. Поэтому обобщенная вероятность безотказной работы в соответствии с аксиомой (2):

$$\hat{p}_c(t) = v_{p,c} [p_{A,c}(t) + j p_{B,c}(t)] = p_c(t) e^{j\phi_c(t)}, \quad (25)$$

где $p_{A,c}(t)$ и $p_{B,c}(t)$ – вероятности безотказной работы сложной ИУС с последовательными элементами по отказам группы А и группы Б соответственно

$$p_{A,c}(t) = \prod_{k=1}^{n_A} p_{A,k}(t), \quad p_{B,c}(t) = \prod_{k=1}^{n_B} p_{B,k}(t), \quad (26)$$

где $p_c(t)$ и $\phi_c(t)$ – соответственно модуль и аргумент обобщенной вероятности безотказной работы

$$p_c(t) = v_{p,c} \sqrt{\left[\prod_{k=1}^{n_A} p_{A,k}(t) \right]^2 + \left[\prod_{k=1}^{n_B} p_{B,k}(t) \right]^2}; \quad (27)$$

$$\phi_c(t) = \text{arctg} \{ e^{-\Lambda_c(t)} \}, \quad (28)$$

$$\Lambda_c(t) = \int_0^t \left[\sum_{k=1}^{n_A} \lambda_{A,k}(t) - \sum_{k=1}^{n_B} \lambda_{B,k}(t) \right] dt. \quad (29)$$

Обобщенная вероятность отказа последовательной ИУС определяется аналогично (16)... (18).

Система, состоящая из m резервированных (параллельных) элементов, m_A из которых имеют только отказы группы А, а m_B только отказы группы Б, переходит в состояние отказа при отказе всех элементов. Поэтому обобщенная вероятность отказа системы

$$\hat{q}_c(t) = v_{q,c} [q_{A,c}(t) + j q_{B,c}(t)], \quad (30)$$

где вероятности отказа ИУС по группам А и Б

$$q_{A,c}(t) = \prod_{i=1}^{m_A} q_{A,i}(t); \quad q_{B,c}(t) = \prod_{k=1}^{m_B} q_{B,k}(t). \quad (31)$$

Если интенсивности отказов каждой из групп удовлетворяют условиям $\lambda_{A,i}(t) \ll 1$ и $\lambda_{B,k}(t) \ll 1$, то

$$q_{A,i}(t) = 1 - e^{-\int_0^t \lambda_{A,i}(t) dt} \approx \int_0^t \lambda_{A,i}(t) dt, \quad (32)$$

$$q_{B,k}(t) = 1 - e^{-\int_0^t \lambda_{B,k}(t) dt} \approx \int_0^t \lambda_{B,k}(t) dt. \quad (33)$$

С учетом (32), (33) и (31) выражение (30) принимает вид

$$\hat{q}_c(t) \approx v_c \left\{ \prod_{i=1}^{m_A} \left[\int_0^t \lambda_{A,i}(t) dt \right] + j \prod_{k=1}^{m_B} \left[\int_0^t \lambda_{B,k}(t) dt \right] \right\}. \quad (34)$$

Следовательно, показатели надежности сложных информационных управляющих систем с последовательными элементами и с резервированием также представимы в комплексном виде, а выражениям (27) и (34), по аналогии с рис. 3. и рис. 4, можно поставить векторные диаграммы.

Выводы

Представление в комплексном виде основных показателей надежности ИУС, все отказы которых делятся на две группы, сочетает сведения как по отказам каждой из групп, так и по всем отказам системы. Это представление непротиворечиво. Оно позволяет дать удобное графическое представление показателей надежности в виде векторной диаграммы (рис. 4). Векторная диаграмма позволяет наглядно оценить показатели надежности и сравнить с показателями другими ИУС аналогичного назначения, включая соотношение и значения этих показателей, тенденцию изменения, а также запас показателей до достижения их предельных значений.

Аналогичным образом представимы в комплексном виде наработки до отказа (или на отказ в восстанавливаемых системах), коэффициенты готовности, простоя и иные показатели надежности информационных управляющих систем.

Литература

1. ГОСТ 27.002-89 Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. – Введен впервые; введ. 01.07.1990. – М.: Издательство стандартов, 1990. – 64 с.
2. Дмитриев С.П. Информационная надежность, контроль и диагностика навигационных систем / С.П. Дмитриев, Н.В. Колесов, А.В. Осипов; 2-е изд., перераб. – СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электронприбор», 2004. – 208 с.
3. Шаманов В.И. Эксплуатация стареющих систем автоматики и телемеханики / В.И. Шаманов // Железнодорожный транспорт. – 1997. – № 12. – С. 20-24.
4. Тупышев В.А. Использование винеровских моделей для описания уходов гироскопов и ошибок измерения в задаче оценивания состояния инерциальных навигационных систем / В.А. Тупышев // Гиро-

скопия и навигация. – 2007. – № 3. – С. 23-32.

5. Борисов А.А. Оценивание остаточной надежности на основе модели утраты работоспособности / А.А. Борисов, Г.Д. Карташов // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2006. – № 10. – С. 4-10.

6. Мухомад Ю.Ф. Микроэлектронные информационно-управляющие системы: учебн. пособие / Ю.Ф. Мухомад. – Иркутск: ИрГУПС, 2004. – 404 с.

Поступила в редакцию 15.05.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф., заведующий лабораторией отдела физических проблем, Засл. деятель науки Российской Федерации и Республики Бурятия Ю.Б. Башкуев, Бурятский научный центр Сибирского отделения РАН, Улан-Удэ.

АНАЛІЗ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ СКЛАДНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ, ЩО УПРАВЛЯЮТЬ, З ГРУПАМИ ВІДМОВ РІЗНОГО ПОХОДЖЕННЯ

В.С. Марюхненко

Запропонована, на аксіоматичній основі, комплексна форма представлення показників надійності невідновлюваних інформаційних систем, що управляють, з незалежними відмовами різного генезису, які розділені на дві групи в залежності від їх причин. Приведені аксіоми і термінологія опису показників надійності в комплексній формі. Розглянуті комплексні форми показників надійності, а саме, інтенсивності відмов, ймовірність безвідмовної роботи, ймовірність відмови, для складних систем без резервування і з резервуванням заміщенням.

Ключові слова: ймовірність безвідмовної роботи, ймовірність відмови, інтенсивність відмов, надійність, система, що управляє.

ANALYSIS OF RELIABILITY OF THE DIFFICULT INFORMATIVE SENSOR-BASED SYSTEMS INDEXES WITH GROUPS OF REFUSES OF DIFFERENT ORIGIN

V.S. Marukhnenko

The complex form of presentation of reliability of the unrestored informative sensor-based systems indexes is offered, on axiomatic basis. Assumed that refusals are independent. The refusals of different origin are parted on two groups depending on reasons of origin. Axioms and terminology of description of reliability indexes are resulted in a complex form. The complex forms of reliability indexes are considered. The complex forms of intensity of refusals, probability of faultless work, probability of refusal are considered in particular. These indexes are considered for the difficult systems without reserving and with reserving of substitution a method.

Keywords: probability of faultless work, probability of refuse, intensity of refuses, reliability, sensor-based system.

Марюхненко Виктор Сергеевич – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика» Иркутского Государственного университета путей сообщения, Иркутск, Россия, e-mail: maryuhnenko__v@irgups.ru.