УДК 62-519

Надежность стареющих автоматизированных систем

Алексей ФОМИН
Alexey F.FOMIN

Юрий ЕРМОЛИН
Yury A.ERMOLIN

Ермолин Юрий Александрович *– доктор технических наук, профессор кафедры «Управление и информатика в технических системах» Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ).*
Фомин Алексей Федорович *– доктор технических наук, профессор кафедры «Радиотехника и электросвязь» МИИТ.*

Предлагается методика стационаризации потока отказов, предназначенная для расчета показателей надежности стареющих объектов транспорта и телекоммуникационных сетей. Рассматриваются два возможных подхода к решению поставленной задачи. Их оценку подкрепляют приближенные к практике частные случаи.

Ключевые слова: транспорт, телекоммуникации, надежность, стареющий объект, поток отказов, стационаризация.

В теории надежности [1] стареющими принято называть технические объекты, для которых интенсивность отказов λ с течением времени эксплуатации увеличивается, т.е. $\lambda = \lambda(t)$ – возрастающая функция своего аргумента. Существующие же инженерные методики расчета оценок надежности в подавляющем большинстве случаев исходят из предположения, что $\lambda = const$, т.е. из стационарности процесса. Отсюда следует, что применение расчетных формул, справедливых лишь при стационарности, для оценки таких показателей, как средняя наработка объекта на отказ или вероятность его безотказной работы за заданное время, с математической точки зрения оказывается некорректным.

Есть объекты, к надежности функционирования которых в силу их особой социальной значимости предъявляются повышенные требования. К таким объектам можно отнести, например, различные автоматические и автоматизированные системы [2], используемые на транспорте (в том числе – железнодорожном), телекоммуникационные сети [3], нефте-, газо- и водораспределительные структуры [4] и др.

Эксплуатация подобных систем предусматривает выполнение ряда нормативных регламентных мероприятий, определенной дисциплины обслуживания – мониторинг, профилактические и капитальные ремонты, плановые замены оборудования и т. п., направленных на поддержание объектов в требуемом техническом состоянии. Научно обоснованная разработка содержания и периодичности таких мероприятий базируется на общепринятых показателях надежности. Неучет старения объекта может привести к неоправданно «оптимистическим» оценкам его надежностных характеристик, что чревато возникновением аварийных, а иногда и катастрофических ситуаций. Поэтому создание методик оценки показателей надежности стареющих объектов имеет не только теоретическое, но и сугубо практическое значение.

Одним из возможных способов учета эффекта старения в рамках существующих методик оценки показателей надежности для стационарных случаев является замена функции надежности объекта [5], находящегося под воздействием нестационарного потока отказов, некоторой функцией $p_c(t)$, соответствующей фиктивному стационарному процессу с эквивалентной интенсивностью отказов $\lambda_c = const$, численное значение которой выбирается из дополнительных условий.

При разработке такой методики стационаризации потока отказов используются следующие соображения.

Известно [1], что все характеристики надежности взаимосвязаны. В частности, одна из важнейших – вероятность безотказной работы (иначе – функция надежности) объекта $p(t)$ связана с интенсивностью потока его отказов $\lambda(t)$ зависимостью:

$$p(t) = \exp\left\{-\int_0^t \lambda(t)dt\right\}, \qquad (1)$$

а среднее время наработки на отказ T при известной $p(t)$ вычисляется как

$$T = \int_0^\infty p(t)dt = \int_0^\infty \exp\left\{-\int_0^t \lambda(t)dt\right\}dt. \qquad (2)$$

В частном случае стационарного потока отказов, когда $\lambda(t) = const = \lambda_c$, подстановка этого значения в выражение (1) дает для функции надежности $p_c(t)$:

$$p_c(t) = e^{-\lambda_c t} \qquad (3)$$

и для среднего времени жизни элемента T_c – по формуле (2):

$$T_c = \frac{1}{\lambda_c}. \qquad (4)$$

При стационаризации реального нестационарного потока отказов объекта предлагается заменить его стационарным с параметром λ_c, выбираемым с учетом некоторых дополнительных соображений. Здесь рассматриваются два возможных подхода к решению этой задачи.

1-й подход состоит в том, что для определения стационарной интенсивности отказов эквивалентного (в смысле надежности) объекта используется следующий факт. Из формул (3) и (4) видно, что при $t = \frac{1}{\lambda_c}$ вероятность безотказной работы объекта равна e^{-1}. Интенсивность λ_c подбирается таким образом, что при этом значении *t* вероятности безотказной работы обоих объектов (реального, т. е. стареющего, и фиктивного) одинаковы. Приравнивая выражения (1) и (3) при значении аргумента $t = \frac{1}{\lambda_c}$, имеем:

$$\int_0^{\frac{1}{\lambda_c}} \lambda(t)dt = 1. \qquad (5)$$

Разрешая уравнение (5) относительно λ_c, получим значение интенсивности отказов фиктивного стационарного процесса, выраженное через параметры стареющего элемента $\lambda(t)$, наилучшее в смысле принятого критерия приближения.

Рассмотрим предлагаемую методику для некоторых частных случаев.

Случай 1. Допустим, что интенсивность отказов стареющего объекта описывается выражением

$$\lambda(t) = \lambda_0 + \alpha t, \qquad (6)$$

где λ_0 – интенсивность отказов в настоящее время, а α – коэффициент (показатель) старения.

Подставляя это выражение в (5) и вычисляя соответствующий интеграл, приходим к уравнению

$$\frac{\lambda_0}{\lambda_c}+\frac{\alpha}{2\lambda_c^2}=1,$$

решая которое относительно λ_c, получаем

$$\lambda_c=\frac{\lambda_0+\sqrt{\lambda_0^2+2\alpha}}{2}. \quad (7)$$

Из (7) видно, что интенсивность отказов фиктивного стационарного объекта выражается через параметры характеристики отказов стареющего объекта.

Случай 2. Положим теперь, что реальный объект «стареет» по закону возрастающей квадратичной параболы:

$$\lambda(t)=\lambda_0+\alpha t^2. \quad (8)$$

Тогда, выполняя действия, аналогичные предшествующему случаю, приходим к уравнению

$$\frac{\lambda_0}{\lambda_c}+\frac{\alpha}{3\lambda_c^3}=1,$$

решение которого относительно искомой λ_c имеет вид:

$$\lambda_c=\frac{1}{\sqrt[3]{\frac{3}{2\alpha}\left(\sqrt{1+\frac{4\lambda_0^3}{9\alpha}}+1\right)}-\sqrt[3]{\frac{3}{2\alpha}\left(\sqrt{1+\frac{4\lambda_0^3}{9\alpha}}-1\right)}}, \quad (9)$$

то есть λ_c опять выражается через параметры характеристики старения λ_0 и α реального объекта.

Рассмотрение зависимостей $\lambda(t)$ в виде парабол более высокого порядка приводит либо к чрезвычайно громоздкой формуле для λ_c (в случае параболы третьей степени), либо вообще не выражается аналитически (когда степень параболы выше третьей).

Случай 3. Нередко интенсивность отказов стареющего объекта можно описать возрастающей экспонентой вида

$$\lambda(t)=\lambda_0\cdot e^{\alpha t};\ (t\ge 0), \quad (10)$$

где параметры λ_0 и α ($\alpha>0$) имеют тот же физический смысл, что и раньше.

Тогда уравнение (5) трансформируется к виду

$$\int_0^{\frac{1}{\lambda_c}}\lambda_0 e^{\alpha t}dt=1. \quad (11)$$

Произведя необходимое интегрирование и разрешив полученное уравнение относительно λ_c, окончательно имеем:

$$\lambda_c=\lambda_0\cdot\frac{\frac{\alpha}{\lambda_0}}{\ln\left(1+\frac{\alpha}{\lambda_0}\right)}. \quad (12)$$

Таким образом, λ_c растет по мере увеличения отношения показателя старения α реального объекта к начальному значению интенсивности отказов λ_0.

2-й подход. Представляется, что этот подход к определению интенсивности отказов λ_c эквивалентного объекта, заменяющего стареющий, в большей степени отвечает практической постановке задачи при оценке надежности объекта в реальных условиях. Обычно такая оценка вычисляется не вообще, а для некоторого интервала $T_{пр}$ – времени прогноза по отношению к настоящему моменту. Поэтому рассматриваемый подход предполагает определять λ_c из условия равенства функций надежности $p(t)$ и $p_c(t)$ именно при $t=T_{пр}$, т. е. из требования, чтобы при $t=T_{пр}$ вероятности отказов стареющего и стационарного (фиктивного) объектов были бы одинаковы. Тогда с учетом (1) и (3) имеем

$$\int_0^{T_{пр}}\lambda(t)dt=\lambda_c T_{пр}. \quad (13)$$

Отсюда вытекает

$$\lambda_c=\frac{1}{T_{пр}}\int_0^{T_{пр}}\lambda(t)dt, \quad (14)$$

то есть в этом случае интенсивность отказов эквивалентного объекта должна определяться как интегральное среднее значение $\lambda(t)$ за время прогноза.

Для конкретности опять рассмотрим некоторые частные случаи.

Случай 1. Интенсивность отказов реального элемента возрастает по линейному закону (6). Тогда по формуле (14) находим:

$$\lambda_c=\lambda_0+\frac{\alpha T_{пр}}{2}. \quad (15)$$

Случай 2. Характер изменения $\lambda(t)$ – квадратичная парабола (8). В этом варианте, применяя формулу (14), получим:

$$\lambda_c=\lambda_0+\frac{\alpha T_{пр}^2}{3}. \quad (16)$$

Случай 3. Вообще, если

$$\lambda(t)=\lambda_0+\alpha t^m, \quad (17)$$

и характер старения объекта описывается параболой m-го порядка, то имеем:

$$\lambda_c = \lambda_0 + \frac{\alpha T_{np}^m}{m+1}. \qquad (18)$$

Случай 4. Изменение интенсивности отказов стареющего объекта – возрастающая экспонента (10). Тогда, производя необходимые вычисления по формуле (14), приходим к выражению:

$$\lambda_c = \lambda_0 \frac{e^{\alpha T_{np}} - 1}{\alpha T_{np}}. \qquad (19)$$

Отметим, что выведенные формулы (15), (16), (18) и (19) имеют более простой вид, нежели те, что получены в 1-м подходе, и вследствие этого – более удобны в практических вычислениях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гнеденко Б. В., Беляев Ю. К., Соловьев А. Д. Математические методы в теории надежности. – М.: Наука, 1965.
2. Дружинин Г. В. Надежность автоматизированных производственных систем. – М.: Энергоатомиздат, 1986.
3. Таненбаум Э. Компьютерные сети. – СПб.: Питер, 2006.
4. Алексеев М. И., Ермолин Ю. А. Надежность систем водоотведения. – СПб., 2010.
5. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. – М.: Наука, 1969. ●

RELIABILITY OF AGING AUTOMATION SYSTEMS

Ermolin, Yury A. *– D.Sc. (Tech), professor at the department of control and informatics in technical systems of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT).*
Fomin, Alexey F. *– D.Sc. (Tech), professor at the department of radio engineering and communications of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT).*

The authors put forward a technique of stationarization of the failure flow intended for calculating reliability rates of aging objects of transportation and communication networks. They propose to substitute a stationarization of a real non-stationary failure flow for a stationary one with a parameter λ_c, chosen on the basis of some additional considerations, and study two possible approaches to solve the problem.

Key words: transport, transportation, telecommunications, reliability, aging object, failure flow, stationarization.

Координаты авторов (contact information): Ермолин Ю. А. – (495) 684–21–68, Фомин А. Ф. – (495) 684–24–39

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ТРАНСПОРТНАЯ СИСТЕМА СТОЛИЦЫ

Опыт всех крупных городов мира показывает, что внедрение интеллектуальных транспортных систем (ИТС) позволяет существенно улучшить дорожную ситуацию и повысить безопасность движения.

Принятая в 2011 году программа развития транспортной системы Москвы рассчитана на пять лет и предусматривает последовательное внедрение элементов интеллектуального управления дорожным движением с соблюдением единой логики транспортных потоков, принципов системной организации работы городских отраслевых комплексов.

Согласно плану, охват города ИТС предполагает такую динамику:

(Движение и транспорт. – М., 2011)