

ОБ АНАЛИЗЕ СВЯЗИ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ АВТОМАТИКИ С ВНЕШНИМИ ВОЗДЕЙСТВИЯМИ

В. Н. Давиденко

Как известно, под отказом элемента автоматики понимают полную либо частичную утрату работоспособности, причем под работоспособностью понимается состояние элемента, при котором он в данный момент времени соответствует всем требованиям, установленным в отношении его основных параметров [1].

Каждый конкретный элемент можно охарактеризовать некоторым его параметром A , либо несколькими параметрами $A, B, \dots, N$, определяющими целевое назначение данного элемента и изменяющимися в процессе эксплуатации под действием различных воздействий среды, режимов работы и т. п. Изменяясь, рассматриваемые параметры могут достигать некоторых критических значений $A_{кр}, B_{кр}, \dots, N_{кр}$, при которых состояние элемента считается неудовлетворительным, т. е. наступает событие отказа.

В случае нескольких определяющих параметров их совокупность можно рассматривать как векторный определяющий параметр [2]. Поэтому в дальнейшем мы будем рассматривать некоторый определяющий параметр G , включающий в себя понятия как единичного параметра, так и векторного.

При рассмотрении множества однотипных элементов изменение параметра G во времени чаще всего наиболее удобно представить случайной функцией времени, достаточно полную информацию о которой дает непрерывная регистрация изменений параметра G во времени для каждого элемента данной совокупности.

Для некоторой области значений времени T , надежная работа элемента может быть охарактеризована случайной функцией времени $G(t)$, при условии, что возможные значения параметра $G_1, G_2, \dots, G_n$ в любые моменты времени $t_1, t_2, \dots, t_m$ из области T остаются меньше критического значения параметра $G_{кр}$:

$$G_n(t_m) \leq G_{кр}. \quad (1)$$

Так как $G(t)$ — случайная функция времени, то и моменты нарушения неравенства (1) будут случайны. Отношение элементов, для которых в единицу времени наблюдались выбросы значения параметра G за критическую границу, к числу элементов, для которых в данный отрезок времени сохранялось неравенство (1), обычно служит мерой потока событий отказов, называемой интенсивностью отказов элементов

Для большинства элементов автоматики, при некоторых неизменных внешних условиях, в период нормальной работы (т. е. без учета периодов приработки и износа) закон надежности экспоненциальный с постоянным значением интенсивности отказов $\Lambda = \text{const}$, имеющей смысл математического ожидания потока отказов (нарушений неравенства (1)).

Следовательно, для большинства элементов при определенных и неизменных условиях эксплуатации наблюдается стационарный поток отказов с математическим ожиданием

$$\Lambda(t) = \Lambda = \text{const}.$$

При изменении внешних условий экспоненциальный закон надежности, оставаясь качественно неизменным, приобретает новую количественную меру за счет изменения интенсивности отказов. Так, например, изменение температуры окружающей среды для слюдяных конденсаторов от 20 до 80°С приводит к изменению интенсивности отказов от $0,087 \cdot 10^{-5}$ 1/час до $0,55 \cdot 10^{-5}$ 1/час [3].

Реальные внешние воздействия чаще всего изменяются во времени произвольно и наиболее точно могут быть аппроксимированы стационарными случайными функциями времени.

Таким образом, при эксплуатации элементов автоматики внешние воздействия, изменяясь произвольно во времени, влекут за собою временные изменения интенсивности отказов. Так как при изменяющихся внешних воздействиях $\Lambda(t) \neq \text{const}$, то, следовательно, изменение внешнего воздействия приводит к нарушению стационарности потока отказов. При достаточно интенсивном изменении воздействия и ограниченном времени испытания элементов удобно рассматривать $\Lambda(t)$ как случайную функцию времени. Тогда

$$\Lambda(t) = L_{\Lambda}(t) \cdot E(t), \quad (2)$$

где $E(t)$ — внешнее воздействие, описываемое стационарной случайной функцией времени;

$L_{\Lambda}(t)$ — оператор, ставящий в соответствие некоторой области значений внешних воздействий некоторую область значений интенсивностей отказов.

Требование стационарности внешнего воздействия как причины предполагает стационарность следствия, т. е. стационарность математического ожидания $\Lambda(t)$ нестационарного потока отказов для линейных элементов. Здесь под линейным элементом понимается такой элемент, у которого величина изменения интенсивности отказов может рассматриваться как линейная функция внешних воздействий.

Уравнение (2) остается в силе и для внешних воздействий, описываемых нестационарными случайными функциями времени, для которых необходимо введение в вычисления второго усреднения (т. е. проводится усреднение как по множеству, так и по времени). При этом порядок усреднения независим, и второе усреднение может производиться на любом этапе вычислений [4].

Характер уравнения (2) позволяет поставить три типа задач.

1. Анализ связи внешних воздействий с интенсивностью отказов элементов, т. е. определение оператора $L_{\Lambda}(t)$ по заданному либо полученным экспериментально случайным функциям $E(t)$ и $\Lambda(t)$.

2. Анализ интенсивности отказов по внешнему воздействию, т. е. определение характеристических функций случайной функции $\Lambda(t)$ по заданным характеристическим функциям случайной функции $E(t)$ и оператору $L_{\Lambda}(t)$.

3. Определение максимального уровня надежности на стадии конструирования элемента, т. е. определение такого вида оператора $L_{\Lambda}(t)$, который по известным характеристическим функциям случайной функции $E(t)$ обеспечивал бы минимальное значение интенсивности отказов вновь конструируемых элементов.

Вид уравнения (2) дает формальную возможность использовать для его решения относительно $L_{\Lambda}(t)$ математический аппарат статистической динамики, применяемый при отыскании передаточной функции линейной динамической системы с одним входом и одним выходом, при прохождении

через нее случайного сигнала, формально отождествляя оператор $L_{\Lambda}(t)$ с импульсной переходной функцией. Уравнение (2) остается в силе и при рассмотрении нелинейных элементов, для которых применим математический аппарат статистической динамики нелинейных систем автоматического управления.

Полагаем, что внешнее возмущающее воздействие описывается стационарной случайной функцией $E(t)$, заданной ее реализацией в виде некоторой кривой, для которой вычислены

математическое ожидание

$$m_E(t) = m_E = \text{const}; \quad (3)$$

дисперсия

$$D_E(t) = D_E = \text{const}; \quad (4)$$

корреляционная функция

$$K_E(T) = \int_0^{\infty} E(t) E(t+T) dt. \quad (5)$$

Интенсивность отказов данной совокупности линейных элементов задана также стационарной случайной функцией $\Lambda(t)$, совмещенной по времени с функцией внешнего воздействия $E(t)$.

Согласно [5], возмущающее воздействие $E(t)$ и интенсивность отказов элементов $\Lambda(t)$ будут связаны интегральным уравнением Винера — Хопфа с ядром типа свертки:

$$K_{EA}(T) = \int_0^{\infty} K_E(T-t) L_{\Lambda}(t) dt, \quad (6)$$

где $K_{EA}(T)$ — взаимокорреляционная функция между внешним воздействием и интенсивностью отказов элементов, дающая возможность учесть только те отказы, которые обусловлены проявлением рассматриваемого воздействия.

Взаимокорреляционная функция $K_{EA}(T)$ может быть определена по заданным случайным функциям:

$$K_{EA}(T) = \int_0^{\infty} E(t) \Lambda(t-T) dt. \quad (7)$$

Если по результатам вычислений получается, что $K_{EA}(T) \equiv 0$, то это значит, что данное воздействие не является причиной изменения интенсивности отказов. Однако многочисленные данные подтверждают тот факт, что такие внешние воздействия, как виброударные и температурные, для большинства элементов автоматики являются основной причиной изменения интенсивности отказов.

Умножая обе части уравнения (6) на $e^{-j\omega t}$, интегрируя по τ от $-\infty$ до $+\infty$, производя некоторую замену переменных и другие преобразования, получаем уравнение вида

$$\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-j\omega T} K_{EA}(T) dT = \int_0^{\infty} e^{-j\omega t} L_{\Lambda}(t) dt \int_{-\infty}^{+\infty} K_E(\varphi) e^{-j\omega \varphi} d\varphi. \quad (8)$$

В уравнении (8)

$$\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-j\omega T} K_{EA}(T) dT = S_{EA}(\omega); \quad (9)$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} K_E(\varphi) e^{-j\omega \varphi} d\varphi = S_E(\omega). \quad (10)$$

Выражение (9) представляет собой взаимную спектральную плотность между внешним воздействием и интенсивностью отказов. Выражение (10) — спектральная плотность внешнего воздействия.

Из уравнения (8), согласно [5],

$$\int_0^{\infty} e^{-j\omega t} L_A(t) dt = L_A(j\omega). \quad (11)$$

Поэтому

$$L_A(j\omega) = \frac{S_{EA}(\omega)}{S_E(\omega)}, \quad (12)$$

т. е. оператор уравнения (2) в функции мнимого аргумента определяется как частное от деления взаимной спектральной плотности между данным внешним воздействием и интенсивностью отказов элементов на спектральную плотность данного внешнего воздействия. При этом взаимная спектральная плотность $S_{EA}(\omega)$ и спектральная плотность $S_E(\omega)$ связаны с соответствующими им взаимнокорреляционной и корреляционной функциями преобразованием Фурье.

В функции вещественного аргумента (времени) оператор будет иметь вид

$$L_A(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} L_A(j\omega) e^{j\omega t} d\omega. \quad (13)$$

Анализ связи внешних воздействий с интенсивностью отказов в вышеизложенном аспекте позволит достаточно полно охарактеризовать физические процессы, протекающие в элементах автоматических устройств при том либо ином внешнем воздействии, позволит рационально судить о необходимых конструктивных изменениях элементов, повышающих их надежность.

Вычисление операторов для групп элементов, характеризующихся конструктивным сходством, позволит оценивать их надежность по характеристическим функциям воздействий.

Применение приведенного метода предполагается в первую очередь для самовосстанавливающихся отказов (сбоев), например, для анализа связи самосрабатываний электромагнитных релейных элементов с произвольными внешними виброударными воздействиями. Разумеется, для вычисления характеристических функций случайных функций $\Lambda(t)$ и $E(t)$ необходимо применение вычислительных машин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Теория надежности в области радиоэлектроники. Сб. рекомендуемых терминов. Изд. АН СССР, 1962.
2. Г. В. Дружинин. Предсказание сохранности элементов и систем автоматики при векторных определяющих параметрах. Изв. АН СССР, ОТН, «Энергетика и автоматика», № 2, 1962.
3. Г. В. Дружинин. Надежность устройства автоматики, Изд. «Энергия». М., 1964.
4. А. А. Харкевич. Спектры и анализы. Физматгиз, 1962.
5. В. В. Солодовников. Статистическая динамика линейных систем автоматического управления. Физматгиз, 1960.