

Б. В. КАРПЮК
(Новосибирск)

О НАДЕЖНОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Основной задачей, решаемой в настоящей статье, является конкретизация понятия «надежность» для измерительных информационных систем (ИИС) и рассмотрение некоторых вопросов и особенностей проблемы надежности ИИС.

Попробуем сначала обосновать возможность и целесообразность подобной конкретизации.

В литературе по кибернетике система определяется как любой комплекс динамически связанных элементов ([1], стр. 20) или: «...все, состоящее из связанных друг с другом частей, мы будем называть системой» ([1], стр. 22). Такое определение системы является чрезвычайно общим (см. также определение относительно обособленных систем в [2]), так как ему удовлетворяют, например, измерительный прибор, автомобиль, вычислительная машина, любой живой организм, экономика некоторого района или государства, общественный строй, Солнечная система и т. п. Под термином «надежность» в современной теории надежности обычно понимается определенное объективно существующее свойство систем (элементов), которое обеспечивает нормальное функционирование системы (элемента) в определенных условиях окружающей среды (см., например, [3—7] и др.). Исходя из такого понимания надежности, ее можно определить как свойство или способность системы сохранять себя или, другими словами, способность системы «выживать» (для живых организмов это способность выживать без кавычек) в определенных условиях окружающей среды. Из этого определения следует, что предметом «всеобщей» теории надежности следует считать свойство (способность) систем «выживать», а объектной областью* этой теории — любые объекты, удовлетворяющие общему определению системы.

Обратимся теперь к существующей терминологии надежности и рассмотрим наиболее распространенные определения понятий «система» и «надежность».

Система — совокупность совместно действующих объектов, которая предназначена для самостоятельного выполнения заданных функций [3].

Надежность — способность (или свойство) системы (элемента) вы-

* Под объектной областью подразумевается множество всех объектов, которые могут исследоваться и обладают данным свойством [8].

полнять заданные функции при определенных (или заданных) условиях эксплуатации (см., например, [4, 7] и др.).

Эти определения (а также методы и результаты теории) отчетливо показывают, что в современной теории надежности исследуется надежность только таких систем, организация которых подчинена осуществлению поставленных перед ними задач, т. е. так называемых целесообразных систем [1]. Такие системы, как правило, являются техническими системами или устройствами, искусственно созданными для выполнения определенных функций.

Таким образом, мы приходим к выводу, что объектом обладать надежностью, а это уже в некоторой степени является обоснованием возможности дальнейшей конкретизации понятия «надежность» и даже намечает путь такой конкретизации. Этот путь — сужение объектной области теории — используется нами в дальнейшем.

Так как все технические системы созданы (и создаются) для выполнения заданных функций в определенных условиях эксплуатации, то и надежность этих систем, очевидно, целесообразно определять только по отношению к этим заданным функциям и условиям эксплуатации. При этом значительно упрощается исследование надежности технических систем, так как при исследовании нет необходимости учитывать всевозможные функции, свойства и условия эксплуатации систем (необходимо учитывать только те, которые задаются, см., например, [9]), появляется возможность обоснованного выбора (исходя из заданных функций и условий эксплуатации системы) количественных критериев оценки надежности систем и т. п.

Это обстоятельство является также обоснованием возможности и целесообразности конкретизации понятия «надежность» для отдельных классов технических систем, выделяемых по их функциональному назначению.

Следует отметить, что приведенное выше определение понятия «надежность» кажется несколько субъективным, так как функции и условия эксплуатации системы определяются ее создателями (т. е. проектировщиками и изготовителями). Субъективность подобного определения иногда рассматривается как один из его основных недостатков [5]. Однако, по нашему мнению, такая субъективность, в силу вышеприведенных соображений, просто неизбежна, более того, она целесообразна и должна рассматриваться скорее как достоинство, чем недостаток. Кстати сказать, предлагаемое в [5] определение надежности («надежность есть свойство аппаратуры сохранять свои выходные характеристики (параметры) в определенных пределах при данных условиях эксплуатации») не менее субъективно, так как выходные характеристики аппаратуры и определенные пределы их изменения задаются проектировщиками и изготовителями так же, как и ее функции или объем задания. Подобная «субъективность» определения только кажущаяся, так как фактически понятие надежности связано с объективными свойствами, которыми обладает любая техническая система после ее изготовления (в этом легко убедиться даже при беглом ознакомлении с современной теорией надежности). В действительности мы имеем дело не с субъективным, а с более конкретным определением, одно из достоинств которого заклю-

чается в том, что оно создает предпосылки для построения более глубокой теории надежности. В этой теории наряду с общими методами и результатами, распространяемыми на любые системы, должны разрабатываться и такие методы, которые максимально учитывают специфику отдельных классов систем и условий их эксплуатации. Можно ожидать, что эти «специализированные» методы не только обогатят и углубят теорию надежности, но и окажутся эффективнее универсальных методов при исследовании и создании конкретных систем.

Обратимся теперь к измерительным информационным системам и их основному назначению. Из определения ИИС [10, 11] следует, что основное назначение ИИС — давать информацию об исследуемом объекте, причем эта информация, получаемая путем выполнения измерительных операций [11], должна с определенной заданной степенью точности соответствовать измеряемым величинам, характеризующим состояние исследуемого объекта.

Свойство информации, получаемой от ИИС, правильно отражать истинные состояния исследуемых объектов часто называют достоверностью информации (см., например, [12]). Используя понятие достоверности информации и не касаясь пока вопроса о ее количественных характеристиках, можно сказать, что ИИС выполняет свои функции (соответствует своему назначению, сохраняет себя как целесообразная система) до тех пор, пока она сохраняет требуемую (заданную) достоверность информации.

Таким образом, мы приходим к следующему конкретизированному понятию надежности ИИС: *надежность ИИС — это их свойство сохранять заданную достоверность информации об исследуемом объекте в определенных (заданных) условиях эксплуатации.*

Из такого понимания надежности ИИС следует, что предметом теории надежности ИИС является их свойство (способность) сохранять заданную достоверность информации, а объектной областью этой теории — не любые технические системы, а только ИИС. Следует заметить, однако, что объектную область теории надежности ИИС можно расширить, по-видимому, и на другие информационные системы (системы, служащие для получения информации не только путем выполнения измерительных операций, системы передачи информации и др.).

Рассмотрим теперь влияние конкретизации термина «надежность» применительно к ИИС на построение теории надежности этих систем.

При исследовании надежности ИИС, как и при исследовании надежности любых систем, в первую очередь возникает задача установления критериев или количественных характеристик надежности. Далее, очевидно, необходимо найти методы вычисления этих характеристик* (решение задачи анализа или прогнозирования надежности) и, наконец, методы построения ИИС с заданными или оптимальными характеристиками надежности — решение задачи синтеза (или оптимального синтеза) по критериям надежности. Для решения этих задач необходимо, очевидно, использовать подходящие математические модели систем и соответствующий математический аппарат.

Так как процессы, протекающие в системах во время их эксплуатации, являются в основном случайными, то наиболее естественными моделями систем будут различные вероятностные модели, а математическим аппаратом — в общем случае теория случайных функций, а в не-

* Здесь, как и далее, не рассматриваются различные экспериментальные методы определения и оптимизации характеристик надежности — физическое моделирование, испытания готовых систем и т. п.

которых частных случаях — теория случайных величин или случайных событий.

Достаточно общую модель для описания системы можно представить следующим образом [13]. Состояние системы характеризуется выходными параметрами, определяющими ее работоспособность и качество выполнения заданных функций. Совокупность выходных параметров системы можно представить вектором $Y = \{Y_1, \dots, Y_m\}$, где Y_i — i -й выходной параметр; $i=1, 2, \dots, m$; m — число параметров. Эти параметры под воздействием различных факторов, связанных с условиями эксплуатации, несовершенством технологии изготовления элементов и т. п., меняются случайным образом, поэтому вектор Y является, по существу, векторной случайной функцией $Y(t)$. Входными параметрами системы называют те, которые оказывают влияние на выходные параметры. К ним относятся входные сигналы, аддитивные помехи, параметры элементов системы, воздействия внешней среды и т. п. Входные параметры образуют векторную случайную функцию $X(t) = \{X_1(t), \dots, X_n(t)\}$.

Каждому значению вектора $Y(t)$ (или $X(t)$) можно в пространстве параметров $Y_i(t)$ (или $X_j(t)$) поставить в однозначное соответствие некоторую точку, которая называется рабочей или определяющей точкой системы. Система выполняет свои функции только тогда, когда ее рабочая точка находится внутри некоторой допустимой области пространства, называемой обычно областью работоспособности.

На основании этой модели нетрудно установить критерии надежности системы, в качестве которых можно принять, например, время пребывания рабочей точки в области работоспособности или вероятность того, что рабочая точка за время T не выйдет из области работоспособности.

Для решения задачи анализа надежности необходимо знать границы области работоспособности (их определяют исходя из технических условий на систему) и статистические характеристики выходных параметров. Однако получение статистических характеристик выходных параметров системы или связано с большими трудностями (необходимо большое количество систем и длительный опыт их эксплуатации), или просто невозможно (например, для проектируемых систем). Поэтому, как правило, приходится статистические характеристики $Y(t)$ определять по статистическим характеристикам $X(t)$, причем для этого необходимо знать оператор системы. Тогда для решения задачи анализа надежности можно воспользоваться следующей общей формулой [13]:

$$T(y) = A_T^{-1} A X(t), \quad (1)$$

где $T(y)$ — обратная случайная функция по отношению к $Y(t)$, которая получается в результате решения стохастического уравнения вида

$$Y(t) - y = 0; \quad (2)$$

A_T^{-1} — оператор, определяющий закон преобразования $Y(t)$ в $T(y)$, выраженный уравнением (2);

A — оператор системы;

$X(t)$ — вектор входных параметров.

Критерии надежности определяются по известным характеристикам, например, по многомерным законам распределения функции $T(y)$.

Так как в настоящее время пока не существует общей теории по-

строения оптимальных систем, то задачу синтеза системы по критерию надежности сводят обычно к задаче оптимального управления [13, 14], которую можно сформулировать так: по заданным статистическим характеристикам $X(t)$ и структуре системы определить такой оптимальный оператор (т. е. математические операции над сигналами и помехами), который обеспечивает экстремум критерия оптимизации.

Из конкретизированного понятия надежности ИИС следует, что единственной выходной характеристикой ИИС, которую необходимо учитывать при исследовании надежности, является достоверность информации $D(t)$. Сохранение заданной достоверности можно выразить в виде неравенства $D(t) \geq d_*$, или $D(t) - d_* \geq 0$. В качестве количественных характеристик надежности ИИС можно принять время до первого пересечения сверху вниз случайной функцией $D(t)$ уровня d (время безотказной работы), вероятность того, что это время не меньше некоторого τ (вероятность безотказной работы в течение времени τ) и др. Воспользовавшись формулой (1), можно определить обратную по отношению к $D(t)$ случайную функцию $T(d)$, и, таким образом, в принципе задача анализа или прогнозирования надежности ИИС будет решена. Однако такой общий метод решения задачи связан с рядом серьезных трудностей и его следует рассматривать как иллюстрацию принципиальной возможности решения подобных задач. Этот метод отражает больше математическую сторону вопроса, и для его практического применения к реальным системам необходимо проделать еще очень большую работу.

Рассмотрим некоторые трудности, связанные с применением этого метода, и некоторые его недостатки. Первая трудность состоит в получении достаточно полных характеристик (например, многомерных законов) распределения векторной случайной функции $X(t)$, в которую должны быть включены в качестве составляющих все параметры и факторы, влияющие на выходные характеристики системы. Вторая трудность связана с тем, что для большинства реальных ИИС (за исключением, быть может, простейших ИИС) практически невозможно выразить в виде математического оператора связь между $D(t)$ и $X(t)$. Здесь же следует отметить и один недостаток метода. Дело в том, что многие факторы, влияющие на $D(t)$ (например, параметры элементов выходных блоков ИИС), преобразуются фактически не одним оператором A всей системы, а различными частными операторами. Необходимо отметить также и ряд математических (и вычислительных) трудностей, связанных в первую очередь с многомерностью областей работоспособности в пространстве входных параметров, многомерностью вектора $X(t)$ и т. п. Еще один недостаток этого общего метода при использовании его для анализа надежности ИИС связан с одной особенностью ИИС, состоящей в том, что, как правило, вероятностные характеристики входных сигналов ИИС (т. е. измеряемых величин) заранее неизвестны. ИИС в ряде случаев как раз и предназначены для того, чтобы путем измерений отдельных значений входной величины и соответствующей обработки результатов измерений получить вероятностные характеристики этой величины. В связи с этим, естественно, отпадает возможность выразить $D(t)$ через $X(t)$ и воспользоваться формулой (1).

Перечисленные выше трудности и недостатки метода не являются, конечно, непреодолимыми. При определенных ограничениях и упрощающих предположениях задачи анализа надежности ИИС можно успешно решать и этим методом. Однако наличие этих трудностей свидетельствует об актуальности исследований, направленных на их преодоление, а также об актуальности поиска других методов.

Для исследования надежности ИИС предлагается использовать несколько отличную от описанной выше модель, в которой, по нашему мнению, учтены основные особенности ИИС и которая является более удобной и целесообразной. При построении такой модели мы исходим из следующих достаточно очевидных предположений.

1. Надежность ИИС должна определяться только свойствами и параметрами самой системы и ее элементов и, следовательно, должна быть инвариантна к входным величинам, для измерения которых предназначена ИИС. Другими словами, предполагается, что свойство ИИС сохранять заданную достоверность информации не зависит от характеристик измеряемых величин.

2. Достоверность информации ИИС и ее сохранение определяются, с одной стороны, внешними помехами и, с другой стороны, безотказностью системы по постепенным, внезапным и перемежающимся от-
казам, т. е. D_n не зависит от времени. Все выполняемые ИИС операции (или преобразования) с учетом последовательности и качества их выполнения будем называть оператором ИИС и обозначать буквой A (с индексами или без них).

Оператор A_n идеальной ИИС должен быть, очевидно, таким, чтобы выполнялись условия $D_n \geq d_z$ и $D_n = \text{const}$ (последнее только при заданных условиях эксплуатации). Также очевидно, что оператор A любой реальной ИИС будет отличаться от A_n и изменяться с течением времени, т. е. будет функцией времени $A(t)$.

Представление ИИС в виде оператора $A(t)$ и определение отличий $A(t)$ от A_n являются основой предлагаемой модели для исследования надежности ИИС.

Для математического описания функционирования ИИС, т. е. для представления ИИС в виде оператора, удобно воспользоваться аппаратом логических схем алгоритмов (ЛСА) [15], так как в ЛСА легко учесть все операции (не только математические, но и логические и др.), выполняемые ИИС, и последовательность их выполнения. Этот аппарат в настоящее время широко применяется в вычислительной технике [16], а также известны попытки использования его и в измерительной технике (см., например, [17]). Применение ЛСА дает возможность представлять в удобном и компактном виде функционирование не только действующих, но и проектируемых систем, причем в последнем случае, используя равносильные преобразования ЛСА [15], можно получать различные варианты системы и выбирать среди них оптимальные, например наиболее простые в смысле реализации. Кроме того, очень важным достоинством представления функционирования систем в виде ЛСА является возможность перехода от ЛСА к обобщенным булевым функциям [18], включающим время. Некоторые методы подобного перехода описаны в [19]. Использование такого перехода позволяет представить

* Так как речь идет о заданной достоверности и заданных условиях эксплуатации, то более правильно и точно следует говорить об относительно идеальной ИИС, т. е. идеальной только при заданных достоверности и условиях эксплуатации. Однако для дальнейшего изложения это не существенно и ради краткости мы употребляем термин «идеальная ИИС».

оператор системы в виде совокупности математических операторов, реализуемых различными функциональными блоками (делителями, усилителями и другими функциональными преобразователями), и логических операторов, реализуемых конечными автоматами, которые управляют работой других функциональных блоков системы. Подобное представление оператора системы является, на наш взгляд, весьма перспективным при исследовании надежности ИИС, так как оно дает возможность достаточно четко определять количественные критерии надежности и отличия операторов $A(t)$ от A_n , формулировать задачи по анализу надежности и синтезу надежных ИИС, а также использовать методы и результаты некоторых математических теорий (например, теории конечных и вероятностных автоматов) для решения этих задач.

Итак, суть предлагаемой модели для исследования надежности ИИС состоит в том, что ИИС представляется в виде ЛСА, а затем осуществляется переход от ЛСА к обобщенным булевым функциям и математическим операторам.

Рассмотрим теперь более подробно, что же дает применение этой модели при исследовании надежности ИИС. Начнем с установления отличий операторов реальных и идеальных ИИС. Первое отличие состоит в том, что в идеальных ИИС обобщенные булевы функции реализуются конечными детерминированными автоматами, в то время как в реальных ИИС они реализуются вероятностными автоматами*. Второе отличие касается математических операторов и состоит в том, что в идеальной системе все математические операции выполняются с заданной точностью с вероятностью $p=1$, а в реальных — с вероятностью $p \leq 1$, причем эта вероятность изменяется с течением времени.

Для количественной оценки надежности ИИС естественно использовать такие общепринятые критерии, как вероятность безотказной работы, время до первого отказа, коэффициент готовности и др., однако в данной модели эти критерии приобретают более конкретное содержание. Так, например, вероятность безотказной работы системы есть вероятность выполнения обобщенных булевых функций и математических операций (с допустимыми погрешностями), задаваемых ЛСА системы.

Конкретизация содержания количественных критериев надежности значительно облегчает поиск методов определения (вычисления) этих критериев, т. е. способствует успешному решению задач анализа, прогнозирования и оптимизации надежности ИИС. Действительно, при использовании предлагаемой модели задача анализа или прогнозирования надежности ИИС сводится к следующим двум задачам: 1) анализ (прогнозирование) надежности вероятностных автоматов и 2) анализ надежности функциональных преобразователей, реализующих математические операторы. Для решения первой из них с успехом можно применить многие методы и результаты теории вероятностных автоматов. Что касается второй задачи, то она, очевидно, полностью может быть решена только с помощью так называемых функциональных методов расчета надежности [21], которые учитывают функциональные связи и постепенные отказы элементов функциональных преобразователей.

Более подробное изложение вопросов анализа и прогнозирования надежности ИИС позволило бы с большей полнотой и убедительностью раскрыть возможности предлагаемой модели, однако оно выходит за рамки настоящей статьи. Следует отметить, что аналогичная ситуация

* О вероятностных автоматах и соотношении между вероятностными и конечными детерминированными автоматами см., например, в [20].

имеет место и при рассмотрении вопросов оптимизации надежности и синтеза надежных ИИС.

Мы полагаем, что даже на основании тех общих соображений, которые были приведены выше, можно сделать вывод о полезности предлагаемой модели для исследования надежности ИИС. По крайней мере, эта модель позволяет поставить ряд конкретных задач по исследованию надежности и наметить пути их решения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ст. Бир. Кибернетика и управление производством. М., Физматгиз, 1963.
2. Г. Грневский. Кибернетика без математики. М., «Советское радио», 1964.
3. Надежность технических систем и изделий. Основные понятия. Терминология. М., «Наука», 1965.
4. Н. А. Шишонок, В. Ф. Репкин, Л. Л. Барвинский. Основы теории надежности и эксплуатации радиоэлектронной техники. М., «Советское радио», 1964.
5. А. М. Половко. Основы теории надежности. М., «Наука», 1964.
6. И. Базовский. Надежность. Теория и практика. М., «Мир», 1965.
7. Г. В. Дружинин. Надежность устройств автоматики. М.—Л., «Энергия», 1964.
8. М. А. Розов. Предмет исследования и некоторые закономерности его формирования и развития — В сб. «Проблемы исследования систем и структур». М., 1965.
9. Б. В. Гнеденко, Ю. К. Беляев, А. Д. Соловьев. Математические методы в теории надежности. М., «Наука», 1965.
10. К. Б. Карандеев. Измерительные информационные системы и автоматика.— Вестник АН СССР, 1961, № 10.
11. Б. В. Карпюк, М. П. Цапенко. Об измерительных информационных системах.— Автометрия, 1965, № 2.
12. В. И. Перов, Т. Д. Жолковер. Способы оценки и некоторые пути повышения достоверности результатов автоматического контроля. Автоматический контроль и методы электрических измерений (Труды V конференции), т. II. Новосибирск, «Наука», 1966.
13. Б. В. Васильев, Б. А. Козлов, Л. Г. Ткаченко. Надежность и эффективность радиоэлектронных устройств. М., «Советское радио», 1964.
14. В. С. Пугачев. Теория случайных функций и ее применение к задачам автоматического управления. М., Физматгиз, 1962.
15. Ю. И. Янов. О логических схемах алгоритмов.— Проблемы кибернетики, вып. 1. М., Физматгиз, 1958.
16. А. И. Китов, Н. А. Крилицкий. Электронные цифровые машины и программирование. М., Физматгиз, 1959.
17. Б. В. Карпюк. Об алгоритмическом описании процессов измерения.— Измерительная техника, 1962, № 1.
18. Э. Беркли. Символическая логика и разумные машины. М., Изд-во иностр. лит. 1961.
19. В. Ф. Дьяченко. О методе перехода от логических схем алгоритмов к булевым функциям.— Изв. АН СССР, Техническая кибернетика, 1963, № 6.
20. М. О. Рабин. Вероятностные автоматы.— Кибернетический сборник, вып. 9. М., «Мир», 1964.
21. К. А. Ивуду. Оптимизация устройств автоматики по критерию надежности. М.—Л., «Энергия», 1966.

*Поступила в редакцию
17 февраля 1967 г.*