



УДК 519.718.2

В. К. Орлов, Б. П. Подкопаев

Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет "ЛЭТИ"

Характеристики надежности избыточных радиолокационных и радионавигационных систем

Рассмотрена оценка надежности радиосистем, работающих краткосрочными сеансами и имеющих в своем составе средства диагностирования и восстановления. Надежность систем со средствами функционального диагностирования характеризуется вероятностью достоверного функционирования, надежность систем со средствами тестового диагностирования – разновидностью коэффициента оперативной готовности, а надежность систем с восстановлением – комбинацией этих параметров. Определены условия эффективного введения избыточности.

Надежность, избыточность, функциональное диагностирование, тестовое диагностирование, достоверность функционирования, оперативная готовность и восстановление систем

Время активной работы значительной части радиолокационных и радионавигационных систем составляет малую долю их полного жизненного цикла. К такого рода системам относятся авиационные радиолокационные и радионавигационные комплексы, средства навигации наземных подвижных объектов, системы координатометрии и т. п. В силу специфики эксплуатации они функционируют в штатном режиме краткосрочными сеансами и большую часть времени жизни находятся в "холодном" (нерабочем) состоянии. При этом вероятность безотказной работы в течение сеанса для таких систем необходимо поддерживать на уровне 0.95...0.999 [1].

Для повышения целостности выходной информации в рассматриваемые системы часто вводится аппаратная избыточность, в результате чего они становятся либо отказочувствительными, либо отказоустойчивыми [2]. В первом случае система в течение сеанса не восстанавливается, а введенная избыточность обеспечивает обнаружение в ней ошибок в реальном масштабе времени (функциональное диагностирование). Оценивать эффективность средств диагностирования с помощью классических надежностных характеристик типа вероятности безотказной работы P , коэффициента готовности K_T и среднего времени безотказной работы T_0 нельзя, так как вве-

денная избыточность данные показатели заведомо ухудшает. Для этой цели следует использовать приращение достоверности функционирования D как характеристики, учитывающей не только вероятность появления отказов в аппаратуре, но и вероятность обнаружения последних [2].

Достоверность функционирования в качестве характеристики надежности введена в середине 70-х гг. прошлого столетия и определяется как

$$D = P(1 - P_{л}) + (1 - P)P_{пр}, \quad (1)$$

где $P_{л}$, $P_{пр}$ – вероятности ложного и правильного обнаружений ошибок функционирования системы соответственно. Все входящие в (1) вероятности определяются на конец сеанса.

Анализ (1) показывает, что при отсутствии избыточности $D = P$. В системах с диагностированием достоверность функционирования может быть существенно увеличена, если вероятность ложного обнаружения ошибок $P_{л}$ мала. Действительно, $D \approx P + (1 - P)P_{пр}$ при $P_{л} \rightarrow 0$, поэтому введение средств диагностирования, обладающих даже не очень большой вероятностью правильного обнаружения ошибок ($P_{пр} = 0.5...0.8$) существенно повышает достоверность функционирования. Переход к более наглядной вероятности недостоверного функционирования $Q = (1 - D)$

показывает, что в рассматриваемом случае она определяется как $Q = (1 - P)(1 - P_{гр})$ и при введении диагностирования уменьшится по сравнению с $Q_{нд}$ недиагностируемой системы ($P_{пр} = 0$) в $1/(1 - P_{пр})$ раз. Для приведенных ранее значений $P_{пр}$ это дает выигрыш по Q от 2 до 5 раз.

Таким образом, при синтезе средств диагностирования следует в первую очередь стараться минимизировать величину $P_{д}$.

На практике при решении диагностических задач малое значение $P_{д}$ часто недостижимо. В таких случаях критерием целесообразности введения средств диагностирования следует считать выполнение неравенства $D > D_0 = P$, где D_0 – достоверность функционирования недиагностируемой системы. Преобразовав последнее неравенство, приведем критерий целесообразности к более удобному виду:

$$P_{пр}/P > P_{д}/(1 - P). \quad (2)$$

Указанные вероятности вычисляются в предположении исправности системы в начале сеанса. Неравенство (2) позволяет на практике по известным P , $P_{пр}$ и $P_{д}$ принять квалифицированное решение о применении средств диагностирования в рабочем режиме.

Повышение достоверности функционирования систем позволяет производить отбраковку заведомо неверной информации и своевременно отключать отказавшую аппаратуру, что особенно важно для восстанавливаемых и комплексированных систем.

Как уже указывалось, функциональное диагностирование в рассматриваемых системах дает максимальный эффект при условии их исправности к началу рабочего периода. Последнее предполагает возможность проведения в "холодном" (нерабочем) режиме периодического регламентного обслуживания с восстановлением работоспособности системы за счет использования резервного оборудования. В этом случае в качестве основной надежностной характеристики обычно используют одну из форм коэффициента готовности. Его классическая форма, справедливая для систем с возможностью полного восстановления и регламентного обслуживания по требованию, имеет вид

$$K_{Г} = T_0 / (T_0 + T_{в}),$$

где T_0 , $T_{в}$ – средние времена безотказной работы и восстановления соответственно.

Обычно в "холодном" режиме регламентное обслуживание обусловлено не наличием дефекта, а выполняется по определенному заранее графику. Тогда надежность системы характеризуется коэффициентом оперативной готовности

$$K_{о.г} = K_{Г}(1 - K_{пр}),$$

где $K_{пр}$ – коэффициент простоя, который определяет относительное время пребывания системы в режиме регламентного обслуживания.

Если полное восстановление системы невозможно из-за отсутствия полноты контроля либо из-за ограниченности резерва, то в выражение для $K_{о.г}$ вводится коэффициент восстановления $C < 1$, зависящий в общем случае от времени и характеризующий предельную вероятность восстановления. В результате получим соотношение

$$K_{о.г} = CK_{Г}(1 - K_{пр}), \quad (3)$$

используемое для оценки надежности систем с периодическим регламентным обслуживанием, но с неполным восстановлением.

Нередко регламентное обслуживание выполняется только перед сеансом работы. Тогда вероятность нахождения системы в штатном состоянии определится как

$$P_{шт} = P + (1 - P)C, \quad (4)$$

где вероятность безотказной работы P определена на момент начала сеанса.

Подобным образом оценивается надежность системы и в случае совместного использования обоих видов регламентного обслуживания. При этом в выражение (4) вместо P подставляется значение $K_{о.г}$ (3), в результате чего (4) примет вид

$$P_{шт} = C[K_{Г}(1 - K_{пр})(1 - C) + 1]. \quad (5)$$

Проанализировав (3)–(5), можно установить, что для существенного улучшения надежностных характеристик систем, восстанавливаемых в "холодном" режиме, необходимо увеличивать значение коэффициента восстановления C . Полное восстановление ($C = 1$) теоретически позволяет получить абсолютную надежность системы с предсеансным регламентным обслуживанием ($P_{шт} = 1$ на начало сеанса).

Увеличить коэффициент восстановления C можно с помощью организационных и технических мероприятий. Прежде всего, следует отметить его очевидную зависимость как от наличия

полного комплекта типовых узлов замены в резерве, так и от эффективности процедуры обнаружения дефектов: $C = C_p P_{о,д}$, где C_p – коэффициент, характеризующий полноту доступного резерва; $P_{о,д}$ – вероятность обнаружения дефекта.

Грамотная комплектация резерва для "холодного" режима доводит C_p до максимума ($C_p = 1$), после чего основным способом приближения коэффициента восстановления C к единице становится увеличение вероятности обнаружения ошибок (дефектов) $P_{о,д}$, что возможно лишь при наличии в "холодном" режиме достаточно эффективных средств диагностирования.

Отметим, что увеличение $P_{о,д}$ улучшает характеристики надежности и в "горячем" режиме, приводя при прочих равных условиях к повышению достоверности функционирования системы, однако требования к средствам диагностирования для "холодного" и для "горячего" режимов существенно образом различаются.

Ранее показано, что "горячем" режиме заметное увеличение достоверности функционирования D происходит, если вероятности правильного и ложного обнаружения ошибок имеют значения $P_{пр} > 0.5$ и $P_{л} < 0.1$ соответственно. Простое приближение $P_{пр}$ к 1 практически бесполезно либо даже вредно, если с его ростом пропорционально увеличивается и $P_{л}$. В результате основное требование к диагностическим средствам "горячего" режима сводится к достижению значений $P_{пр}$ порядка 0.8...0.9 при достаточно близких к нулю значениях $P_{л}$.

В "холодном" режиме уменьшение вероятности необнаружения дефектов $Q_{н} = 1 - P_{пр}$ дает почти квадратичное уменьшение вероятности нахождения системы в неработоспособном состоянии к началу сеанса $Q_{шт} = 1 - P_{шт}$, причем возможное при росте $P_{пр}$ увеличение $P_{л}$ практически не сказывается на $Q_{шт}$ и $P_{шт}$, поскольку в процессе регламентного обслуживания систем с достаточным резервом ложные срабатывания средств диагностирования легко выявляются, а их влияние на надежность системы исключается.

Таким образом, основное требование к диагностическим средствам систем с кратковременными сеансами работы состоит в максимизации значения вероятности обнаружения дефектов

(ошибок) $P_{пр}$. Если при этом вероятность ложной тревоги $P_{л} \leq 0.1$, то одни и те же диагностические средства можно использовать как в "горячем", так и в "холодном" режимах. В противном случае для рабочего режима (сеанса) приходится использовать упрощенные средства диагностирования, поступившись уменьшением $P_{пр}$ ради снижения $P_{л}$ до приемлемого значения. Возможно также их разделение на встроенные и на внешние так, чтобы первые обеспечивали необходимую достоверность функционирования D во время сеанса, а совокупность первых и вторых – требуемое значение вероятности нахождения системы в работоспособном состоянии к началу сеанса $P_{шт}$.

Используя полученные результаты, можно определить значения достоверности функционирования и вероятности выполнения задачи в течение сеанса при неизвестном техническом состоянии системы к началу последнего. Для решения первой задачи достаточно перемножить (1) и (5), а для решения второй – P и (5), вычислив значение P на конец сеанса в предположении равенства его 1 в начале.

Отмеченные особенности "горячего" и "холодного" режимов работы определяют выбор средств диагностирования. В первом режиме, как правило, не допускаются перерывы в работе, что определяет целесообразность использования средств функционального диагностирования (ФД). Основная система работает при этом в штатном режиме совместно с диагностическим оборудованием, которое, анализируя реакции системы на рабочие входные воздействия, принимает решение о наличии либо об отсутствии ошибок.

В простейшем случае для осуществления ФД используется дублирование исходной системы, сопровождаемое сравнением выходных реакций обеих систем, что позволяет в полученной паре обнаруживать все ошибки и, как следствие, практически все дефекты, за исключением крайне маловероятных: тех, которые искажают реакции обеих систем одинаковым образом. Такое решение дает значения $P_{пр} \approx 1$, $P_{л} = 1 - P$ и $D \approx P + (1 - P)^2 > P$ при любых значениях P .

Ценой полученного увеличения достоверности является более чем удвоение аппаратных и энергетических затрат, что приемлемо далеко не всегда. Для уменьшения избыточности приходится применительно к известным исходной системе

и классу ошибок в ней синтезировать упрощенное диагностическое устройство, что существенно усложняет решение задачи ФД.

Как показывает практика, аппаратурные затраты на ФД при этом составляют от трети до двух третей объема безызыточной системы, а вероятность $P_{пр} = 0.9 \dots 0.95$, причем несмотря на уменьшение $P_{пр}$ по сравнению с дублированием достоверность функционирования системы обычно повышается по сравнению с рассмотренным ранее вариантом за счет двух-трехкратного уменьшения $P_{л}$ [2].

В "холодном" режиме, как правило, используются средства тестового диагностирования (ТД). В этом случае на вход системы подаются специально подобранные воздействия (тесты) и реакции на них сравниваются с априорно известными эталонами. Работа в штатном режиме при этом невозможна, что определяет ориентацию ТД на режим регламентного обслуживания. Основное преимущество ТД состоит в том, что соответствующим подбором тестов можно обеспечить обнаружение и локализацию практически любых дефектов, получив значение $P_{пр} \approx 1$ и как следствие вероятность работоспособности системы перед сеансом $P_{шт} \approx 1$. При одинаковых значениях $P_{пр}$ и $P_{л}$ ТД в подавляющем большинстве случаев требует существенно меньших аппаратных затрат, чем ФД [3].

Недостатки ТД очевидны и определяются невозможностью штатного использования аппаратуры, находящейся в режиме диагностирования.

Достаточно очевидно, что оба способа решения диагностической задачи связаны между собой, поскольку ТД можно считать ФД на специально подобранных входных воздействиях, а ФД – ТД, использующим в качестве тестовых рабочие входные сигналы. Более того, наилучшие показатели надежности и диагностики получаются при совместном использовании ТД и ФД [4]. Если технические и эксплуатационные условия допускают такое решение, то можно получить высокую достоверность функционирования аппаратуры при относительно небольших аппаратных затратах. Средства ФД в этом случае выбираются из условия обнаружения наиболее вероятных ошибок, т. е. наипростейшие, а средства ТД, обеспечивающие максимально возможную глубину проверки, выводятся из состава бортовой аппаратуры и используются только на технической позиции.

Еще более высокие характеристики надежности имеют системы, при построении которых обеспечивается отказоустойчивость хотя бы важнейших узлов. Такое решение приводит дальнейшему росту аппаратурных и энергетических затрат из-за большой избыточности реализаций, тем не менее для многих систем специального назначения иного способа достижения необходимых параметров не существует. Рассмотрим вопросы, связанные с отказоустойчивостью, несколько подробней.

Очевидно, что в отказоустойчивой системе во время сеанса происходит исправление ошибок. В простейшем случае она состоит из трех идентичных безызыточных систем, причем выходные реакции всей системы формируются из выходных реакций ее компонентов по мажоритарному принципу. Достоверность ее функционирования совпадает с вероятностью безотказной работы и в случае абсолютной надежности мажоритарных органов может быть определена как

$$D = P^2 (3 - 2P), \quad (6)$$

причем вероятность безотказной работы безызыточной системы P определяется на конец сеанса.

Из (6) следует, что простейшая мажоритарная система обеспечивает выигрыш по сравнению с исходной безызыточной системой, если вероятность безотказной работы последней превышает 0.5.

Для дальнейшего увеличения достоверности функционирования рассматриваемой системы необходимо ввести в нее средства ФД. Поскольку мажоритарная система уже избыточна, объем дополнительного диагностического оборудования для нее весьма невелик, и не равная 1 вероятность безотказной работы средств ФД практически не приводит к снижению надежности системы. В результате достоверность функционирования мажоритарной системы со средствами диагностирования можно оценить следующим неравенством:

$$P(P^2 - 3P + 3) < D < P(P^2 - 3P + 3) + (1 - P)^3. \quad (7)$$

Второй способ построения отказоустойчивой в реальном времени системы состоит в использовании двух одинаковых систем с ФД, находящихся во время сеанса в "горячем" состоянии. Одна из них считается основной и при отсутствии ошибок выполняет рабочие функции. Другая система считается резервной, замещая основную при фиксации ошибки в ней.

Достоверность функционирования двухканальной отказоустойчивой системы оценить сложнее, чем мажоритарной, причем соответствующая фор-

мула выводится на основе расширенного толкования соотношения (1). Если при этом считать вспомогательные коммутационные элементы системы абсолютно надежными, то после ряда преобразований соотношение, определяющее искомую достоверность функционирования, трансформируется к виду

$$D = P(1 - P_{\text{л}}) + P_{\text{пр}}(1 - P) [P(1 - P_{\text{л}}) + (1 - P)P_{\text{пр}}] + P_{\text{л}} [P(1 - P_{\text{л}}) + (1 - P)P_{\text{пр}}], \quad (8)$$

причем вероятности P , $P_{\text{л}}$ и $P_{\text{пр}}$ определяются для одного безызбыточного канала при использовании в нем средств ФД.

Соотношения (6)–(8) предназначены для оценки надежности относительно простых отка-

зоустойчивых объектов, образованных из двух или из трех безызбыточных каналов, однако при необходимости они достаточно легко обобщаются на многоканальный случай.

В заключение следует отметить, что хотя в настоящей статье количественная оценка аппаратных затрат, обеспечивающих получение желаемых характеристик надежности, не производилась, структура полученных расчетных соотношений показывает, что упомянутые затраты могут быть достаточно велики. Авторы надеются, что представленные в статье результаты будут полезны при поиске разумного компромисса между противоречивыми требованиями обеспечения высокой надежности радиоэлектронных систем и снижения аппаратных затрат на их реализацию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Герчиков Ф. Г., Орлов В. К., Подкопаев Б. П. Оценка надежности бортовой аппаратуры РСБН со средствами диагностирования и восстановления // *Вопр. радиоэлектроники. Серия РЛТ*. 2009. Вып. 2. С. 12–20.
2. Щербаков Н. С. Достоверность работы цифровых устройств. М.: Машиностроение, 1989. 224 с.
3. Колесов Н. В. Многоуровневое проектирование средств тестового и функционального диагностирования специализированных вычислительных комплексов. СПб.: Изд-во ЦНИИ "Электроприбор", 1992. 70 с.
4. Подкопаев Б. П. Алгебраическая теория функционального диагностирования динамических систем. СПб.: ООО "Техномедиа"; Элмор, 2007. Ч. 1: Системы, диагностирование систем, системные алгебры. 132 с.

V. K. Orlov, B. P. Podkopaev

Saint-Petersburg state electrotechnical university "LETI"

Characteristics of reliability of the superfluous radar-tracking and radio navigational systems

The assessment of reliability of the radio systems working with short-term sessions and incorporating diagnostic devices and restoration is considered. Reliability of systems with means of functional diagnosing is characterized by probability of reliable functioning, reliability of systems with means of test diagnosing – a kind of coefficient of operational readiness, and reliability of systems with restoration – a combination of these parameters. Conditions of effective redundancy introduction are defined.

Reliability, redundancy, functional diagnosing, test diagnosing, functioning reliability, operational readiness and systems restoration

Статья поступила в редакцию 10 марта 2014 г.