

## ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ НАДЕЖНОСТИ РЛС НА ОСНОВЕ ГИПОТЕЗ МОНОТОННОСТИ

А. В. ТИМОШЕНКО<sup>1</sup>, А. В. ОСИПОВ<sup>2</sup>, А. Ю. ПЕРЛОВ<sup>1</sup>,  
Д. В. РЯБЧЕНКО<sup>3</sup>, И. П. ЛОЗИНСКИЙ<sup>3</sup>, В. Б. ТИХОНОВ<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет „МИЭТ“, 124498, Зеленоград, Россия  
E-mail: laperlov@yandex.ru

<sup>2</sup>АО „Национальный Экологический Оператор“, 125047, Москва, Россия

<sup>3</sup>Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, 119991, Москва, Россия

<sup>4</sup>Ярославское высшее военное училище противовоздушной обороны, 150001, Ярославль, Россия

Достигнутый уровень цифровизации современных радиолокационных станций (РЛС) и наличие контрольно-диагностической системы, регистрирующей в реальном масштабе времени данные о техническом состоянии изделия и его компонентов, позволяют перейти к формированию структурной схемы РЛС. Решение этой задачи возможно с использованием булевой алгебры. Исследована возможность определения по экспериментальным данным критических элементов РЛС, выявление которых обеспечивает повышение точности прогноза и соответственно коэффициента готовности. Предложен алгоритм формирования схемы надежности по данным, основанный на синтезе логической функции из уникальных состояний функционирующей системы. В качестве примера синтеза логической функции из уникальных состояний системы в модельном эксперименте выбраны кратковременные самоустраняющиеся отказы, обусловленные перегревом блоков усиления мощности из состава передающей подрешетки. Предложенный методический аппарат формирования структурной схемы надежности РЛС на основе поиска уникальных наборов состояний ее элементов позволяет по мере возникновения новых отказов уточнять схему надежности в процессе эксплуатации изделия.

**Ключевые слова:** структурная схема надежности, РЛС, булева алгебра, отказ, прогнозирование

**Введение, постановка задачи.** Современные радиолокационные станции (РЛС) представляют собой высокоинтегральные цифровые системы, построенные на базе радиоэлектронных комплексов, оснащенных, в свою очередь, значительным количеством технологической аппаратуры [1].

В новых образцах РЛС созданы предпосылки для перехода на фактически интеллектуальные системы превентивного технического обслуживания (ТО), эффективность которого определяется точностью и горизонтами прогноза, зависящими от количества и главное — качества данных о техническом состоянии изделия.

Достоинствами превентивного ТО являются:

- 1) возможность исключения из объемов проверок характеристик РЛС, параметры которых соответствуют заданным, что обеспечивает сокращение расходов на эксплуатацию;
- 2) применение такого показателя надежности, как коэффициент готовности (Кг), в качестве комплексной характеристики надежности, дающей оценку технического состояния, в т.ч. на перспективный период;
- 3) поддержание работоспособного технического состояния РЛС на длительный период эксплуатации за счет охвата контролем наиболее критических элементов;
- 4) определение времени начала ТО по результатам контроля технического состояния.

Вместе с тем значительное количество элементов контроля (несколько десятков тысяч) в современных РЛС усложняет процесс оперативной и высокоточной оценки такого важного показателя надежности, как коэффициент готовности.

С этой целью в РЛС требуется внедрение новой контрольно-диагностической системы (КДС), решающей задачи сбора, обработки, отображения и хранения информации о техническом состоянии и функционировании элементов всех уровней разукрупнения (от ячейки до изделия).

Традиционно системы контроля и диагностики используют данные со всех элементов аппаратуры, связанных друг с другом, как правило, по иерархическому принципу на основе конструктивного деления изделия, что затрудняет оперативный поиск неисправности аппаратуры, влияющей на отказ изделия.

Исключить отрицательное влияние на точность и горизонт прогноза излишней информации позволяет применение для формирования состава КДС структурной схемы надежности РЛС, определяемой по данным обработки потока информации о техническом состоянии, с последующим управлением (изменением) состава КДС для формирования потока данных о наиболее информативных элементах с точки зрения влияния на отказ РЛС. Указанное обстоятельство позволяет сформировать наиболее информативное пространство признаков для решения задачи высокоточного прогнозирования отказов.

Под структурной схемой надежности понимается логическое и графическое представление объекта, отображающее, каким образом безотказность его блоков и их сочетаний влияют на безотказность объекта\*. Таким образом, для формирования структурной схемы надежности необходимо определить влияние элементов, отказ которых ведет к полному отказу системы, назовем их критическими элементами РЛС.

**Описание теоретических методов.** Анализ публикаций [2—6] показал, что для формирования структурной схемы надежности могут быть использованы методы машинного обучения и логические методы, в частности, построение совершенной конъюнктивной нормальной формы (СКНФ) или совершенной дизъюнктивной нормальной формы (СДНФ) по исходным данным с последующей ее минимизацией.

Для формирования структурной схемы надежности могут использоваться методы машинного обучения:

- 1) наивный байесовский классификатор — семейство простых „вероятностных классификаторов“, основанных на применении теоремы Байеса. Согласно байесовскому подходу к классификации, если плотности распределения каждого из классов известны, то искомый алгоритм можно выписать в явном аналитическом виде. Более того, этот алгоритм оптимален, то есть обладает минимальной вероятностью ошибок;

- 2) дерево принятия решений — используется в качестве модели прогнозирования, чтобы перейти от наблюдений об объекте (представленных на ветвях) к выводам о целевом зна-

---

\* ГОСТ Р. Р 27.002-2015. Надежность в технике. Термины и определения. М.: Стандартиформ, 2016. ГОСТ Р. 51901.14-2007 МЭК 61078: 2006 Менеджмент риска. Структурная схема надежности и булевы методы. М.: Стандартиформ, 2008.

чении переменной (представленной на листах). Дерево решений представляет собой иерархические древовидные структуры, состоящие из решающих правил вида „если ..., то ...“, деревья решений как аналитические модели более интерпретируемы.

Однако поскольку методы машинного обучения являются по сути „черными ящиками“, трудно предсказать поведение обученной таким образом системы на данных, которые не были представлены в обучающей выборке. В ходе обучения данные могут быть заполнены по-разному в зависимости от типа и настроек модели. Это может приводить к тому, что полученная таким образом функция будет давать неправильные результаты, делая метод неприемлемым для формирования структурной схемы надежности.

**Метод, основанный на построении СКНФ (СДНФ).** Из данных о техническом состоянии РЛС можно извлечь множество векторов-состояний блоков системы в различные моменты времени, а также соответствующие состояния системы. По этим данным можно построить таблицу истинности логической функции, определенной на множестве векторов-состояний блоков и принимающей значения, равные соответствующим состояниям системы. При этом в общем случае такая таблица будет неполной. Можно выдвинуть наиболее простую гипотезу, что других отказов, помимо присутствующих в таблице, в системе наблюдаться более не будет. Будем считать, что полученная логическая функция является не полностью определенной и наборы входных переменных, отсутствующие в таблице, отнесем к запрещенным.

Таким образом, можно оценить надежность характеристики РЛС, рассмотрев структурную схему надежности, соответствующую реальным данным КДС. Такая схема надежности будет отличаться от „истинной“ лишь учетом тех отказов, которые в данных никогда не наблюдались и являются редкими. Кроме того, по результатам формирования логической функции становится возможным определить критическими элементы РЛС.

Для восстановления такой конфигурации можно воспользоваться методами СКНФ или СДНФ по исходным данным с последующей ее минимизацией. В этом случае логические функции СКНФ и СДНФ построены путем объединения состояний системы (РЛС), в которых она была неработоспособна (для СКНФ) или работоспособна (для СДНФ). Так как в РЛС отказы редки, рационально использовать именно СКНФ.

При построении СКНФ необходимо для каждого набора переменных, при котором функция равна нулю (отказ), записать их дизъюнкцию, причем переменные, равные единице, берутся с отрицанием. Аналогичные построения можно провести и для СДНФ, однако в этом случае запись будет гораздо более объемной в силу того, что необходимо учесть все возможные состояния, где система работоспособна.

Построенная СКНФ или СДНФ в большинстве случаев будет громоздка, что не позволит сопоставить ей схему надежности оптимального размера. Известные методы минимизации ДНФ не гарантируют в конечном итоге логической функции, которая бы содержала только конъюнкции и дизъюнкции [7]. Ведь в общем случае при построении СКНФ (СДНФ) берутся и отрицания элементов, имеющих значение „ПРАВДА“ („ЛОЖЬ“). В результате в ней также будут присутствовать отрицания, но такие операции не могут присутствовать в реальной схеме надежности. Таким образом, метод, основанный на восстановлении логической функции, не обеспечит высокоточное формирование схемы надежности РЛС с большим количеством однотипных элементов в своем составе.

**Метод, основанный на гипотезах „монотонности“.** Аналогично предыдущему методу по данным технического состояния необходимо построить таблицу истинности. Для этого, во-первых, необходимо выделить уникальные строки в данных. Под этим подразумевается удаление всех повторений состояний элементов системы, чтобы в итоге получить подобие таблицы истинности булевой функции, у которой часть строк неизвестна. По этим данным требуется восстановить зависимость состояния системы от состояния блоков. Обозначим состояния блоков как  $S_1, \dots, S_N$ , где  $N$  — число блоков в системе. Сочетания (наборы) состояний

блоков системы образуют  $N$ -разрядные наборы входных переменных логической функции, значение которой определяется состоянием системы на соответствующих сочетаниях.

Далее выдвинем несколько гипотез (гипотезы 2 и 3 — аналоги свойств монотонных булевых функций):

— гипотеза 1: состояние блоков однозначно определяет состояние системы;

— гипотеза 2: если система находится в состоянии ИСТИНА при состоянии блоков  $S_1, \dots, S_{m-1}, S_m, S_{m+1}, \dots, S_N$ , где  $m$  — произвольное число из отрезка  $[1, N]$  и  $S_m = \text{ЛОЖЬ}$  ( $S_i$  — любые для  $i \neq m$ ,  $i$  принадлежит  $[1, N]$ ), то система также находится в состоянии ИСТИНА при состоянии блоков  $S_1, \dots, S_{m-1}, S'_m, S_{m+1}, \dots, S_N$ , где  $S'_m$  — ИСТИНА. При этом необходимо исключить состояние, когда система работоспособна, но все блоки отказали (т.к. такая ситуация не имеет смысла с физической точки зрения);

— гипотеза 3: если система находится в состоянии ЛОЖЬ при состоянии блоков  $S_1, \dots, S_{m-1}, S_m, S_{m+1}, \dots, S_N$ , где  $m$  — произвольное число из отрезка  $[1, N]$  и  $S_m = \text{ИСТИНА}$  ( $S_i$  — любые для  $i \neq m$ ,  $i$  принадлежит  $[1, N]$ ), то она также будет находиться в состоянии ЛОЖЬ при состоянии блоков  $S_1, \dots, S_{m-1}, S'_m, S_{m+1}, \dots, S_N$ , где  $S'_m$  — ЛОЖЬ. При этом необходимо исключить состояние, когда система неработоспособна, но все блоки находятся в работоспособном состоянии (т.к. такая ситуация не имеет смысла с физической точки зрения).

Кроме того, следует учесть, что:

1) гипотеза 1 введена для того, чтобы исключить скрытые отказы, обусловленные наличием каких-либо еще факторов, не учитываемых в состояниях элементов системы. К примеру, одновременно не должно быть такой ситуации: состояния всех элементов системы совпадают, а состояния системы противоположны;

2) последовательно применяя гипотезу 2 к исходным строкам, а также к строкам, полученным из них, можно присвоить состоянию системы значение ИСТИНА на тех наборах, которые отличаются от какого-либо набора с состоянием системы ИСТИНА, путем замены значений части или всех переменных со значением ЛОЖЬ на значение ИСТИНА. К примеру, есть информация о том, что система работоспособна при отказе блоков  $N-2$  и  $N$  (табл. 1). Согласно гипотезе 2, можем сразу заполнить строки табл. 2.

Таблица 1

Пример строки таблицы истинности

№ отсчета	$S_1$	$S_2$	...	$S_{N-2}$	$S_{N-1}$	$S_N$	Состояние системы
...	ИСТИНА	ИСТИНА	...	ЛОЖЬ	ИСТИНА	ЛОЖЬ	ИСТИНА

Таблица 2

Пример расширения таблицы истинности в соответствии с гипотезой 2

№ отсчета	$S_1$	$S_2$	...	$S_{N-2}$	$S_{N-1}$	$S_N$	Состояние системы
...	ИСТИНА	ИСТИНА	...	ИСТИНА	ИСТИНА	ЛОЖЬ	ИСТИНА
...	ИСТИНА	ИСТИНА	...	ЛОЖЬ	ИСТИНА	ИСТИНА	ИСТИНА
...	ИСТИНА	ИСТИНА	...	ИСТИНА	ИСТИНА	ИСТИНА	ИСТИНА

3) последовательно применяя гипотезу 3 к исходным строкам, а также к строкам, полученным из них, можно присвоить состоянию системы значение ЛОЖЬ в тех строках таблицы истинности, которые отличаются от какой-либо уже заполненной строки с состоянием системы ЛОЖЬ, заменой части или всех состояний элементов, имеющих значение ИСТИНА, на состояние ЛОЖЬ. К примеру, если в данных есть строка, в которой состояние системы оценивается как ЛОЖЬ (табл. 3), то согласно гипотезе 3, справедлива будет табл. 4.

Таблица 3

Пример строки таблицы истинности

№ отсчета	$S_1$	$S_2$	...	$S_{N-2}$	$S_{N-1}$	$S_N$	Состояние системы
...	ЛОЖЬ	ИСТИНА	...	ЛОЖЬ	ИСТИНА	ЛОЖЬ	ЛОЖЬ

Таблица 4

Пример расширения таблицы истинности в соответствии с гипотезой 3

№ отсчета	$S_1$	$S_2$	...	$S_{N-2}$	$S_{N-1}$	$S_N$	Состояние системы
...	ЛОЖЬ	ЛОЖЬ	...	ЛОЖЬ	ИСТИНА	ЛОЖЬ	ЛОЖЬ
...	ЛОЖЬ	ИСТИНА	...	ЛОЖЬ	ЛОЖЬ	ЛОЖЬ	ЛОЖЬ
...	ЛОЖЬ	ЛОЖЬ	...	ЛОЖЬ	ЛОЖЬ	ЛОЖЬ	ЛОЖЬ

Рассмотрим использование метода на реальных данных технического состояния РЛС.

**Формализация РЛС.** Данные о техническом состоянии аппаратуры РЛС, поступающие из КДС, имеют бинарный тип (исправен или неисправен) и в совокупности образуют таблицу состояний элементов изделия (работоспособен/неработоспособен) — блоков из состава РЛС. Пример фрагмента данных о состоянии РЛС приведен ниже. Данные из КДС поступают для записи с определенным интервалом времени, соответствующим одному отсчету.

Под одним отсчетом понимается интервал времени, равный темпу записи с помощью КДС данных о техническом состоянии элементов контроля (аппаратуры).

Так как РЛС конструктивно состоит из радиоэлектронных комплексов (РЭК), имеющих в составе подрешетки с одинаковым числом каналов, то в качестве первого этапа формирования структурной схемы надежности целесообразно рассмотреть влияние аппаратуры подрешетки на работоспособность РЭК. Пример структурной схемы передающего РЭК, имеющего в составе  $M$  подрешеток, приведен на рис. 1 [4].

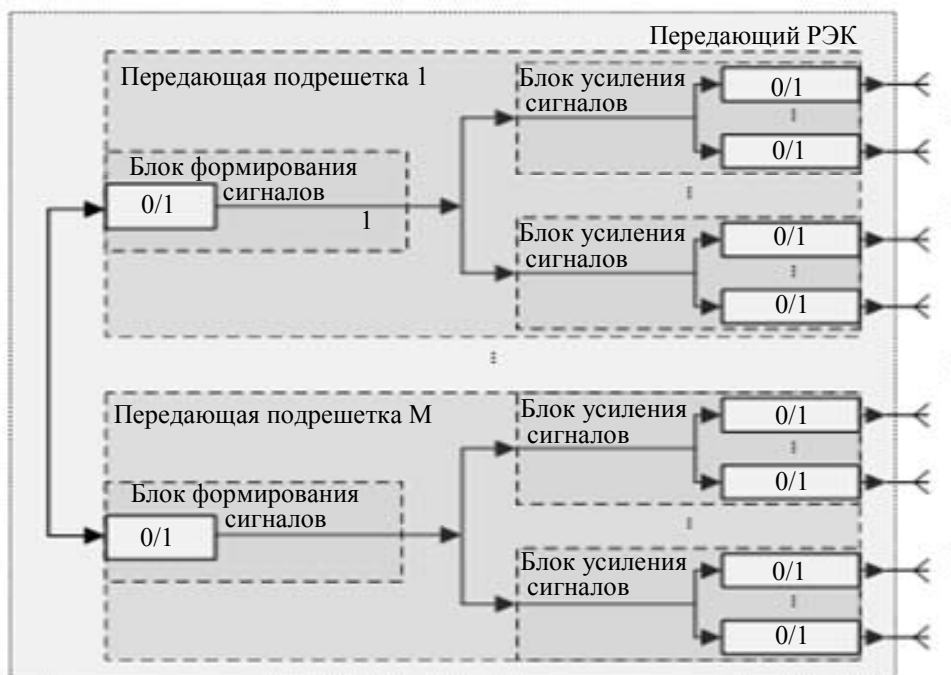


Рис. 1

В этом случае формирование структурной схемы надежности РЛС основано на анализе данных о техническом состоянии аппаратуры подрешетки РЭК и состоянии самой подрешетки как уникального элемента РЛС, не имеющего повторяющейся конфигурации аппаратуры.

**Описание эксперимента.** В качестве примера синтеза логической функции из уникальных состояний системы в модельном эксперименте выбраны кратковременные самоустраниющиеся отказы, обусловленные перегревом блоков усиления мощности из состава передающей подрешетки. При достижении пороговой температуры блок перестает излучать сигнал на время охлаждения и затем возобновляет работу через некоторое число отсчетов при охлаждении до требуемой температуры. Работоспособное состояние блоков, когда температура блока

не достигла порогового значения, обозначено ИСТИНА, а неработоспособное состояние блоков, когда блок охлаждается без нагрузки — ЛОЖЬ.

Исходные данные представлены в виде таблицы истинности (табл. 5).

Таблица 5

**Первые пять строк данных о техническом состоянии системы и ее компонентов**

№ отсчета	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$	$S_6$	$S_7$	$S_8$	$S_9$	$S_{10}$	Состояние системы
0	ИСТИНА	ИСТИНА	ИСТИНА	ИСТИНА	ИСТИНА	ИСТИНА	ЛОЖЬ	ИСТИНА	ИСТИНА	ИСТИНА	ИСТИНА
1	ИСТИНА	ИСТИНА	ИСТИНА	ИСТИНА	ИСТИНА	ИСТИНА	ИСТИНА	ИСТИНА	ИСТИНА	ЛОЖЬ	ИСТИНА
2	ИСТИНА	ИСТИНА	ИСТИНА	ИСТИНА	ЛОЖЬ	ИСТИНА	ИСТИНА	ЛОЖЬ	ЛОЖЬ	ИСТИНА	ЛОЖЬ
3	ИСТИНА	ИСТИНА	ИСТИНА	ИСТИНА	ЛОЖЬ	ИСТИНА	ИСТИНА	ЛОЖЬ	ИСТИНА	ИСТИНА	ЛОЖЬ
4	ЛОЖЬ	ЛОЖЬ	ИСТИНА	ИСТИНА	ЛОЖЬ	ЛОЖЬ	ИСТИНА	ЛОЖЬ	ЛОЖЬ	ЛОЖЬ	ЛОЖЬ
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

По исходным данным требуется восстановить зависимость состояния системы от состояния блоков. Общее число рассматриваемых строк (отсчетов) в таблице — 5000. При этом из них всего 463 строки уникальные, т.е. имеющие отличающиеся от других строк состояния элементов.

В результате применения гипотез к данным, в которых оставлены только уникальные строки, получена таблица истинности, заполнить все строки которой не удалось и осталось лишь два возможных способа ее заполнения. По этим двум вариантам таблицы истинности можно построить два варианта структурной схемы:

1.  $(S_1S_2S_3S_4S_5S_6S_7S_8S_{10}) \vee (S_1S_2S_3S_4S_5S_6S_7S_9S_{10}) \vee (S_1S_2S_3S_4S_5S_6S_8S_9S_{10}) \vee (S_1S_2S_3S_4S_5S_7S_8S_9S_{10}) \vee (S_1S_2S_3S_4S_6S_7S_8S_9S_{10}) \vee (S_1S_2S_3S_5S_6S_7S_8S_9S_{10}) \vee (S_1S_2S_4S_5S_6S_7S_8S_9S_{10}) \vee (S_1S_3S_4S_5S_6S_7S_8S_9S_{10}) \vee (S_1S_2S_3S_4S_5S_6S_7S_8S_9) \vee (S_2S_3S_4S_5S_6S_7S_8S_9S_{10})$ ;

2.  $(S_1S_3S_4S_6S_7S_8S_9S_{10}) \vee (S_1S_2S_3S_4S_5S_6S_7S_8S_{10}) \vee (S_1S_2S_3S_4S_5S_6S_7S_9S_{10}) \vee (S_1S_2S_3S_4S_5S_6S_8S_9S_{10}) \vee (S_1S_2S_3S_4S_5S_7S_8S_9S_{10}) \vee (S_1S_2S_3S_5S_6S_7S_8S_9S_{10}) \vee (S_1S_2S_4S_5S_6S_7S_8S_9S_{10}) \vee (S_1S_2S_3S_4S_5S_6S_7S_8S_9) \vee (S_2S_3S_4S_5S_6S_7S_8S_9S_{10})$ .

Данные выражения можно интерпретировать следующим образом:

- 1) отказ двух любых элементов ведет к отказу системы;
- 2) отказ 2-го или 5-го, а также любого другого элемента ведет к отказу системы; отказ любых двух элементов, кроме 2-го и 5-го, ведет к отказу системы.

В данном случае все элементы (кроме 2-го и 5-го во втором случае) будут одинаково надежны. Пример системы, в которой присутствует элемент, который можно назвать критическим: система выдает отказ при неработоспособности любых двух элементов, кроме одного, отказ которого гарантированно ведет к отказу системы. Поиск таких элементов и является одной из задач предложенного метода.

На рис. 2 приведен алгоритм оценки минимально необходимого объема данных для формирования структурной схемы надежности.

Приведем качественную оценку минимально необходимого объема данных для восстановления схемы надежности.

Назовем „ключевыми“ такие строки, из которых с помощью предложенных выше гипотез можно однозначно восстановить логическую функцию схемы надежности. В общем случае ключевых строк существенно меньше, чем уникальных.

При этом условием нахождения всех ключевых строк будет возможность получить полную таблицу истинности (или большую ее часть) и восстановить, согласно приведенным выше гипотезам, схему надежности.

Вероятность найти все ключевые строки среди  $N$  строк данных можно описать следующим выражением:

$$P_{all}^N = \left[ 1 - (1 - P_1^1)^N \right] \left[ 1 - (1 - P_2^1)^{N-1} \right] \dots \left[ 1 - (1 - P_M^1)^{N-M} \right],$$

где  $M$  — число „ключевых“ строк для данной функции,  $P_k^1$  — вероятность появления  $k$ -й ключевой строки, которая задается как произведение вероятностей отказа для блоков, которые находятся в состоянии отказа для  $k$ -й ключевой строки, умноженное на произведение вероятностей безотказной работы всех остальных блоков. К примеру, для строки (И, И, И, И, И, Л, И, Л, И, И):  $P_k^1 = p_1 p_2 \dots p_5 (1 - p_6) p_7 (1 - p_8) p_9 p_{10}$ , где  $p_i$  — вероятность безотказной работы на одном шаге  $i$ -го блока.

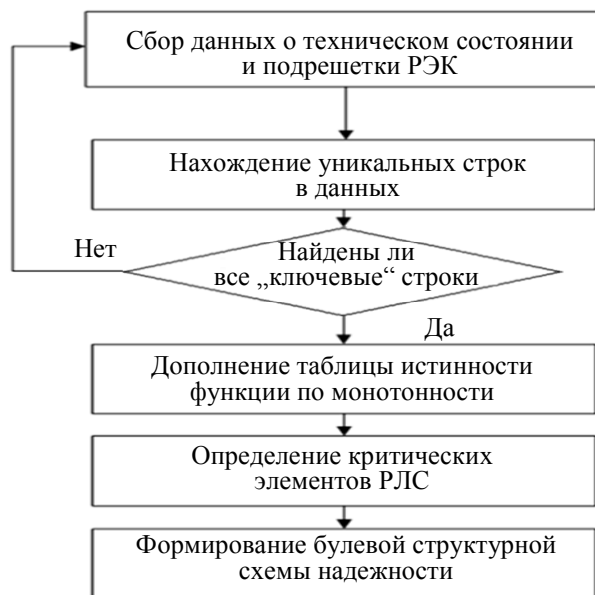


Рис. 2

Полученная формула выведена при допущениях о том, что все строки независимы, также независимы и все блоки. Первое утверждение в общем случае не верно, однако без него затруднительно дать какие-либо оценки. Второе утверждение оправдано тем, что в рассматриваемых данных корреляции между столбцами малы. При этом формула может быть легко обобщена на другие типы функций.

Пользуясь этой формулой, можно оценить количество данных, которые нужны для формирования схемы надежности. В нашем случае для двух получившихся функций можно решить обратную задачу и оценить вероятность того, что в имеющихся данных присутствуют все необходимые строки для их восстановления: для первого и второго варианта это будет 0,9999, а для второго 0,9982.

Отметим, что такие оценки не очень информативны, так как практически равны друг другу. Этот результат есть следствие того, что две полученные функции сильно похожи, а данных много, вследствие этого — сильное ограничение на возможные структурную схему надежности (всего два варианта). Однако если б было всего 1000 записей о состоянии РЛС, то вероятности были бы такими: 0,91 и 0,17. При этом число возможных вариантов схемы надежности увеличилось бы. Но за счет того, что значения вероятностей для разных вариантов будут различаться более отчетливо, можно с большей уверенностью говорить о вероятности обнаружить ту или иную схему надежности.

Предложенный в работе методический аппарат формирования схемы надежности применим также и для других вид отказов аппаратуры РЛС, в том числе постепенных отказов, характеризующихся постепенным изменением значений одного или нескольких заданных параметров изделия.

**Выводы.** Предложенный в статье методический аппарат формирования структурной схемы надежности РЛС на основе поиска уникальных наборов состояний ее элементов

позволяет уточнять схему надежности в процессе эксплуатации изделия по мере возникновения новых отказов.

Использование КДС в РЛС обеспечивает формирование большого объема данных диагностического контроля о функционировании изделия, что позволяет решить задачу формирования схемы надежности, которая, в свою очередь, является источником для получения обучающей выборки модели высокоточного прогнозирования отказов.

На примере данных о техническом состоянии передающей подрешетки РЛС предложен алгоритм формирования схемы надежности по данным, основанный на синтезе логической функции из уникальных состояний системы.

Приведенный алгоритм позволяет определить число элементов, влияющих на работоспособность системы.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Боев С. Ф. Управление рисками проектирования и создания радиолокационных станций дальнего обнаружения. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. 430 с.
2. Флах П. Машинное обучение. Наука и искусство построения алгоритмов, которые извлекают знания из данных. М.: ДМК Пресс, 2015. 399 с.
3. Carvalho T. P., Soares F. A. A. M. N., Vita R., da Francisco P. R., Basto J. P., Al-calá S. G. S. A systematic literature review of machine learning methods applied to predictive maintenance // Comput. Ind. Eng. 2019. N 1. P. 1—12.
4. Левин В. И. Логическое моделирование надежности систем управления. I // Изв. Пензенского гос. пед. ун-та им. В.Г. Белинского. 2011. № 26. С. 568—577.
5. Левин В. И. Логические методы в теории надежности. I. Математический аппарат // Вестн. Тамбовского гос. техн. ун-та. 2009. Т. 15, № 4. С. 873—884.
6. Яблонский С. В. Введение в дискретную математику. М.: Наука, 1986. 384 с.
7. Ступин Д. Д., Перлов А. Ю., Маврин А. В. Исследование и испытания передающих комплексов АФАР для обеспечения тактико-технических характеристик РЛС // Изв. ЮФУ. Технические науки. 2018. Вып. 3. С. 143—155.

#### Сведения об авторах

<b>Александр Васильевич Тимошенко</b>	— д-р техн. наук, профессор; НИУ МИЭТ; начальник лаборатории; E-mail: atimoshenko@rti-mints.ru
<b>Александр Владимирович Осипов</b>	— АО „Национальный Экологический Оператор“, начальник конструкторско-технологического отдела; E-mail: s-ash@mail.ru
<b>Анатолий Юрьевич Перлов</b>	— канд. техн. наук; АО „Радиотехнический институт им. акад. А. Л. Минца“; начальник сектора; НИУ МИЭТ; E-mail: laperlov@yandex.ru
<b>Дмитрий Вадимович Рябченко</b>	— студент; МГУ им. М. В. Ломоносова, физический факультет; E-mail: dimr74rus@gmail.com
<b>Иван Павлович Лозинский</b>	— студент; МГУ им. М. В. Ломоносова, факультет вычислительной математики и кибернетики; E-mail: ivanushka3d@yandex.ru
<b>Владимир Борисович Тихонов</b>	— д-р техн. наук, доцент; ЯВВУ ПВО; заместитель начальника кафедры; E-mail: kaktus38@yandex.ru

Поступила в редакцию  
14.10.2020 г.

**Ссылка для цитирования:** Тимошенко А. В., Осипов А. В., Перлов А. Ю., Рябченко Д. В., Лозинский И. П., Тихонов В. Б. Формирование структурной схемы надежности РЛС на основе гипотез монотонности // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 12. С. 1057—1065.



## FORMATION OF A STRUCTURAL DIAGRAM OF THE RADAR RELIABILITY BASED ON THE HYPOTHESES OF MONOTONY

A. V. Timoshenko<sup>1</sup>, A. V. Osipov<sup>2</sup>, A. Yu. Perlov<sup>1</sup>,  
D. V. Ryabchenko<sup>3</sup>, I. P. Lozinsky<sup>3</sup>, V. B. Tikhonov<sup>4</sup>

<sup>1</sup>National Research University of Electronic Technologies, 124498 Zelenograd, Moscow, Russia  
E-mail: laperlov@yandex.ru

<sup>2</sup> SC National Ecological Operator, 125047, Moscow, Russia

<sup>3</sup> Lomonosov Moscow State University 119991, Moscow, Russia

<sup>4</sup> Yaroslavl Higher Military Air Defense School, 150001, Yaroslavl, Russia Россия

The achieved level of digitalization of modern radar stations (radar) and the availability of a control and diagnostic system that records data on the technical condition of the product and its components in real time allows to move on to solving the problem of forming the structural diagram of the radar. The solution to this problem is possible using Boolean algebra. The possibility of determining the critical elements of the radar based on experimental data, the identification of which provides an increase in the accuracy of the forecast and, accordingly, the readiness coefficient, has been investigated. An algorithm for generating a reliability scheme based on data is proposed, based on the synthesis of a logical function from the unique states of a functioning system. As an example of the synthesis of a logical function from the unique states of the system in a model experiment, we selected short-term self-eliminating failures caused by overheating of the power amplification units from the transmitting sublattice are selected. The proposed methodological apparatus for the formation of the structural diagram of the reliability of the radar based on the search for unique sets of states of its elements allows, as new failures arise, to refine the reliability diagram during the operation of the product.

**Keywords:** reliability block diagram, radar, Boolean algebra, failure, prediction

### REFERENCES

1. Boyev S.F. *Upravleniye riskami proyektirovaniya i sozdaniya radiolokatsionnykh stantsiy dal'nego obnaruzheniya* (Risk Management of Design and Construction of Early Warning Radars), Moscow, 2017, 430 p. (in Russ.)
2. Flach P. *Machine Learning: The Art and Science of Algorithms That Make Sense of Data*, Cambridge University Press, 2012.
3. Carvalho T.P., Soares F.A.A.M.N., Vita R., da Francisco P.R., Basto J.P., Al-calá S.G.S. *Comput. Ind. Eng.*, 2019, no. 1, pp. 1–12.
4. Levin V.I. *Izvestiya Penzenskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta im. V.G. Belinskogo*, 2011, no. 26, pp. 568–577. (in Russ.)
5. Levin V.I. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2009, no. 4(15), pp. 873–884. (in Russ.)
6. Yablonskiy S.V. *Vvedeniye v diskretnuyu matematiku* (Introduction to Discrete Mathematics), Moscow, 1986, 384 p. (in Russ.)
7. Stupin D.D., Perlov A.J., Mavrin A.V. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*, 2018, no. 3, pp. 143–155. (in Russ.)

### Data on authors

<b>Alexander V. Timoshenko</b>	— Dr. Sci., Professor; National Research University of Electronic; Head of Laboratory; E-mail: atimoshenko@rti-mints.ru
<b>Alexander V. Osipov</b>	— JSC National Ecological Operator, Head of the Design and Technological Department; E-mail: s-ash@mail.ru
<b>Anatoly Yu. Perlov</b>	— PhD; JSC A. L. Mints Radiotechnical Institute; Head of Department; National Research University of Electronic; E-mail: laperlov@yandex.ru
<b>Dmitry V. Ryabchenko</b>	— Student; Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics; E-mail: dimr74rus@gmail.com
<b>Ivan P. Lozinsky</b>	— Student; Lomonosov Moscow State University, Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics; E-mail: ivanushka3d@yandex.ru
<b>Vladimir B. Tikhonov</b>	— Dr. Sci., Associate Professor; Yaroslavl Higher Military Air Defense School; Deputy Head of the Department; E-mail: kaktus38@yandex.ru

**For citation:** Timoshenko A. V., Osipov A. V., Perlov A. Yu., Ryabchenko D. V., Lozinsky I. P., Tikhonov V. B. Formation of a structural diagram of the radar reliability based on the hypotheses of monotony. *Journal of Instrument Engineering*. 2020. Vol. 63, N 12. P. 1057—1065 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-12-1057-1065