

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАБОРА ИНФОРМАТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИНДИВИДУАЛЬНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА И НАДЕЖНОСТИ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Р. О. Мишанов, М. Н. Пиганов

В последние годы наблюдается лавинообразный рост числа и последствий техногенных аварий и катастроф [1]. В связи с этим в ходе эксплуатации сложной технической системы необходимо контролировать ее параметры для определения качества функционирования, выполнения своего предназначения, а также безопасности [2]. В [3] предлагаются информативные критерии эффективности и надежности контроля для достижения требуемого уровня безопасности таких систем. Глобальный прорыв в решении проблемы контроля состояния технических систем и отслеживания рисков их функционирования, как считает автор, может сделать электроника. К сложным техническим системам относятся и системы, установленные на борту космического аппарата (КА). Основой таких систем является радиоэлектронная аппаратура, надежность которой определяет эффективность и безопасность их функционирования.

Проблема повышения качества и надежности радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) на сегодняшний день относится к приоритетным направлениям развития космической техники. Наиболее актуальны способы повышения качества аппаратуры и электронной компонентной базы (ЭКБ), позволяющие с минимальными затратами времени и ресурсов обеспечить приемлемый уровень безопасности и надежности. К таким способам относится индивидуальное прогнозирование (ИП) показателей качества и надежности с использованием математической модели (оператора прогнозирования) [4–10].

Выбор информативных параметров построения математической прогнозной модели представляет собой сложную и трудоемкую задачу, так как он преимущественно опирается на интуицию исследователя. Выбор информативных параметров существенно влияет на достоверность математической модели, так как неверный выбор может привести к тому, что оператор прогнозирования окажется не применимым.

В настоящее время не существует четкого и достоверного метода по выбору информативных и прогнозируемых параметров. Известно, что предварительный выбор информативных и прогнозируемых параметров может быть реализован на использовании метода экспертных оценок (метод Дельфы), который позволяет уменьшить ошибки за счет опыта и интуиции многих специалистов, участвующих в опросе [11]. А в дальнейшем, после проведения анализа опросов, исследователь самостоятельно выбирает необходимые параметры из перечня рекомендуемых. Недостатками такого способа является человеческий фактор (субъективизм, ограниченность суждений), а также различные организационные задачи, связанные с проведением опросов, что требует большого количества времени и трудовых затрат. В связи с этим очевидна актуальность разработки достоверного математического метода определения информативных и прогнозируемых параметров.

Цель статьи – разработка методики определения набора информативных параметров для ИП радиоэлектронных средств космического назначения. Метод определения связи между параметрами может быть основан на совместном применении корреляционного и регрессионного анализа.

В данной работе рассматривается применение корреляционного и регрессионного анализа для определения набора информативных параметров (прогнозируемого и информативных) с целью дальнейшего применения при индивидуальном прогнозировании показателей качества и надежности интегральных микросхем (ИМС), выполненных по КМОП-технологии. Для осуществления процесса прогнозирования параметра, характеризующего уровень надежности изделия, необходимо наличие вероятностной (стохастической) зависимости этой величины от выбранных информативных параметров. Прогнозируемый параметр с точки зрения математической статистики является случайным процессом, а функциональная зависимость прогнозируемого параметра от информативных является частным и достаточно редким случаем. Между прогнозируемым и информативными параметрами должна существовать корреляционная связь, что означает

возможность построения кривой регрессии, т.е. аналитической функции, аппроксимирующей эмпирические значения. Такой метод прогнозирования был рассмотрен в работе [12].

Однако нельзя утверждать, что наличие корреляционной связи между прогнозируемым и информативными параметрами означает, что эта связь – непосредственная [13]. Связь между параметрами может существовать за счет других параметров, которые не рассматриваются исследователем. Такие параметры называются латентными переменными. Очевидно, что рассмотрение таких переменных также необходимо учитывать.

Кроме того, наличие корреляционной связи между параметрами не сигнализирует о наличии причинно-следственной связи [13]. Наличие корреляции говорит лишь о степени связи между переменными. Таким образом, причинно-следственную связь обычно интерпретируют на основе проведения эксперимента.

Также необходимо учитывать, что существует случайная корреляция между параметрами, при которой причина ее возникновения отсутствует. В этом случае важным этапом перед установлением корреляции между параметрами является определение причинно-следственной связи.

После установления того, что причинно-следственная связь между информативным параметром существует, эту связь необходимо оценить. Для такой оценки в большинстве случаев используют критерий Пирсона. Следует отметить, что этот критерий используется для определения линейной корреляции при условии, что переменные имеют нормальное распределение. Для оценки связи между переменными в случае нелинейной связи используют корреляционное отношение Пирсона.

В статье предлагается следующая методика определения набора информативных параметров для проведения индивидуального прогнозирования показателей качества и надежности ИМС при условии, что параметры имеют нормальный закон распределения:

- 1) определение необходимых исходных данных:
 - определение прогнозируемого параметра, являющегося показателем качества элемента;
 - первичный отбор информативных параметров электрорадиоизделий (ЭРИ), контролируемых при отборе и тренировке элементов на заводе-изготовителе либо в сертификационном центре;
- 2) исследовательские испытания элементов в соответствии с первичным отбором параметров:
 - разработка программы испытаний, выбор видов и режимов испытательных воздействий;
 - проведение испытаний в соответствии с разработанной программой;
- 3) анализ результатов испытаний:
 - оформление результатов испытаний в виде необходимых таблиц, графиков, диаграмм;
 - оценка корреляционной связи между прогнозируемым параметром и каждым информативным параметром;
 - оценка генеральных коэффициентов корреляции;
 - оценка корреляционной связи между информативными параметрами;
 - вторичный отбор информативных параметров (2–3 параметра), удовлетворяющих предъявляемым условиям;
 - построение кривой регрессии для выбранных параметров.

Определение и отбор прогнозируемого и информативных параметров должен быть основан на анализе механизмов отказов конкретного типа ЭРИ. Например, для ИМС, реализованных по КМОП-технологии, характерными механизмами отказов являются проба подзатворного диэлектрика, электромиграция, генерация «горячих носителей», межслойные дефекты изоляционных диэлектриков, дефекты p - n переходов, дефекты маскирования, образования пустот [14].

Выбор прогнозируемого параметра должен основываться на предположении, что выбираемый показатель однозначно характеризует способность элемента функционировать с заявленными требованиями. Нами на данном этапе с учетом объекта установки и срока функционирования ИМС, выполненных по КМОП-технологии, в качестве такого параметра выбран ток утечки.

Для однозначного определения взаимосвязи механизма отказов и измеренных значений параметров рекомендуется рассматривать результаты анализа однотипных элементов, на основе которых формируются выводы о взаимосвязи, т.е. рассматривать статистические данные об отказах элементов.

Разработка программы испытаний представляет собой сложную задачу для исследователя. Основным вопросом предстоящих испытаний является определение необходимого объема испытаний. На заводе-изготовителе ЭКБ, помимо пооперационного контроля, элементы подвергаются последовательным отбраковочным испытаниям (тренировка элементов) и технологическому прогону. Основное внимание уделяется формированию набора факторов, провоцирующих определенный

механизм отказа. В случае, если к применению в космосе допускается партия ЭКБ военного назначения, проводятся дополнительные отборочные испытания [15]. Таким образом, в качестве рекомендуемого набора видов испытаний следует рассмотреть электротренировку, термотренировку, электротермотренировку, а также требования стандартов MIL-PRF-19500 Screening Requirements (требования по отбраковке элементов космического применения), MIL-STD-883 В (требования военного стандарта США), В ESA/SCC (требования координационного совета по уровням качества ЭКБ космического применения Европейского космического агентства).

Анализ результатов испытаний является достаточно трудоемкой задачей. Поэтому ее выполнение реализуется с помощью ЭВМ и программ проведения статистических расчетов (STATISTICA, MathCAD, Mathematica, PolyAnalyst и др.). Для упрощения расчетов рекомендуется приводить нелинейные связи к линейным, т.е. проводить операцию линеаризации (разбитие нелинейной характеристики на линейные участки). Рекомендуемые критерии принятия информативного параметра в качестве значимого:

- коэффициент корреляции между прогнозируемым и информативным параметрами не менее 0,7;
- коэффициенты корреляции между информативным параметром и другими информативными параметрами не более 0,3.

В качестве примера рассмотрим выборку КМОП-микросхем 765ЛН2 ОС, предназначенных для применения в космических РЭС. Объем выборки составил 50 экземпляров. Такой объем был ранее обоснован и проверен на практике [4, 8, 9]. За прогнозируемый параметр y принят дрейф тока утечки, измеренный после проведения 1000 ч испытательных воздействий. В качестве информативных параметров рассматриваются [16]:

- x_1 – время задержки по переднему фронту сигнала t_p^+ , [мкс];
- x_2 – критическое питающее напряжение $E_{кр. п.}$, [В].

Основной задачей исследования является определение степени связи прогнозируемого параметра с информативными параметрами. Измеренные величины имеют нормальное распределение. В табл. 1 показаны значения параметров микросхем в выборке после проведения обучающего эксперимента.

Таблица 1

Измеренные значения исследуемых параметров микросхем

№ экз.	x_1	x_2	y	№ экз.	x_1	x_2	y
1	4,3	1,3	20	26	5	2,8	33
2	7,2	2,9	38	27	4,4	1,71	24
3	3,2	1,1	12	28	4,5	1,8	25
4	6,6	2,1	47	29	3	1	12
5	5,3	1,72	31	30	4,2	1,56	19
6	4,7	1,6	26	31	4,9	1,6	27
7	6,7	1,8	116	32	7,5	2,8	61
8	6,2	1,73	35	33	4,5	1,62	24
9	6,6	2,4	36	34	7,8	2,78	68
10	3,9	1,3	18	35	8,9	2,96	83
11	4,5	1,4	21	36	4,8	1,7	29
12	4,3	1,4	21	37	3,8	1,4	16
13	4,6	1,5	23	38	6,4	2,5	34
14	5,8	1,7	45	39	6	2,5	41
15	9,2	2,9	84	40	6,9	2,81	44
16	6,5	2,6	39	41	7,1	1,74	36
17	7,0	2,8	37	42	5,0	1,72	27
18	5,2	1,75	30	43	7,3	2,9	55
19	3,8	1,2	17	44	8,1	2,8	74
20	3,7	1,2	16	45	5,2	2,3	33
21	4,4	1,3	22	46	7,1	2,81	46
22	7,1	2,6	53	47	10,8	3,2	92
23	5,1	1,6	28	48	3,5	1,5	15
24	5,0	1,5	27	49	4	1,63	18
25	15,6	3,5	172	50	5,1	1,9	30

Определим, целесообразно ли проведение данного исследования с учетом числа наблюдений n и количества факторов m [16, 17]. Для такой оценки воспользуемся следующим отношением:

$$(n + m) < (n - m)^2. \quad (1)$$

В нашем случае рассматриваются два фактора, влияющие на прогнозируемый параметр, и 50 наблюдений каждого фактора. Таким образом:

$$52 < 9604. \quad (2)$$

Следовательно, данное исследование проводить целесообразно.

Так как принимается допущение, что связь прогнозируемого и информативных параметров рассматривается в качестве линейной, значения параметров измерены в сильных шкалах (в интервальных шкалах), то для оценки тесноты (силы) связи необходимо вычислить коэффициент корреляции Пирсона для случаев связи y и x_1 , y и x_2 . Значение коэффициента корреляции r вычисляется по формуле

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\left[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2\right] \cdot \left[\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2\right]}}, \quad (3)$$

где x_i – i -е числовое значение информативного параметра; $\bar{x}$ – среднее значение информативного параметра; y_i – i -е числовое значение прогнозируемого параметра; $\bar{y}$ – среднее значение прогнозируемого параметра; n – объем выборки.

В зависимости от объема выборки коэффициенты корреляции требуют коррекции [13]. Так как объем выборки меньше 100, то значение коэффициента корреляции Пирсона корректируется по формуле

$$r' = r \left[1 + \frac{1 - r^2}{2(n - 3)} \right], \quad (4)$$

где r' – откорректированное значение коэффициента корреляции Пирсона.

На рис. 1 представлено корреляционное поле точек, описывающих зависимость прогнозируемого параметра y от информативного параметра x_1 , на рис. 2 – y от x_2 .

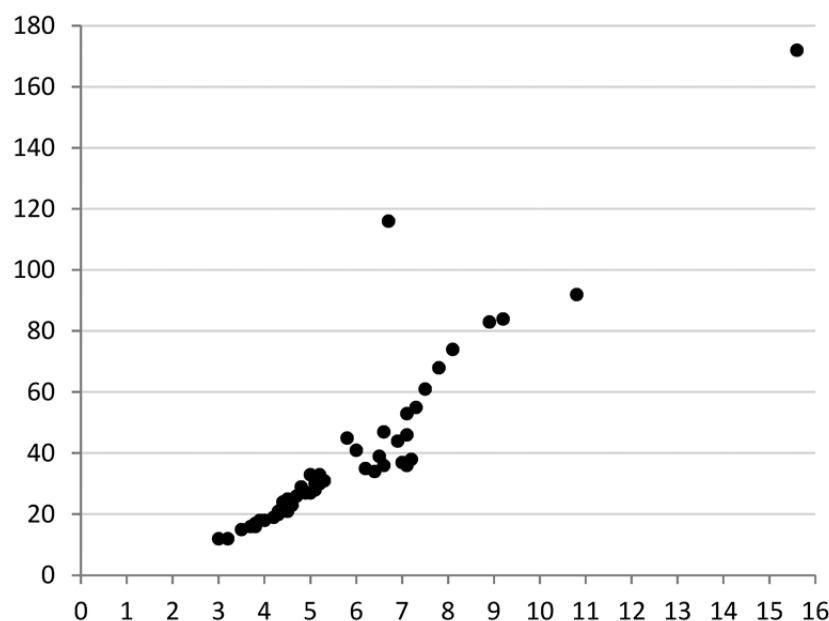


Рис. 1. Корреляционное поле точек, характеризующих зависимость y от x_1

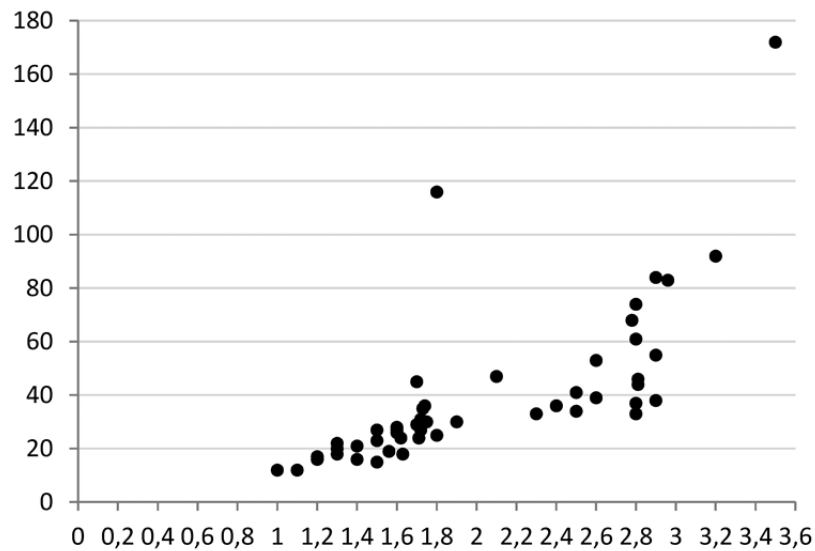


Рис. 2. Корреляционное поле точек, характеризующих зависимость y от x_2

В табл. 2 и 3 приведены расчетные значения для определения коэффициентов корреляции между параметрами x_1 , x_2 и y .

Таблица 2

Расчетные значения для определения коэффициента корреляции между параметрами x_1 и y

№ экз.	x	y	$x_i - \bar{x}$	$y_i - \bar{y}$	$(x_i - \bar{x})^2$	$(y_i - \bar{y})^2$	$(x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})$
1	2	3	4	5	6	7	8
1	4,3	20	-1,546	-19,6	2,390	384,16	30,302
2	7,2	38	1,354	-1,6	1,833	2,56	-2,166
3	3,2	12	-2,646	-27,6	7,001	761,76	73,030
4	6,6	47	0,754	7,4	0,569	54,76	5,580
5	5,3	31	-0,546	-8,6	0,298	73,96	4,696
6	4,7	26	-1,146	-13,6	1,313	184,96	15,586
7	6,7	116	0,854	76,4	0,729	5836,96	65,246
8	6,2	35	0,354	-4,6	0,125	21,16	-1,628
9	6,6	36	0,754	-3,6	0,569	12,96	-2,714
10	3,9	18	-1,946	-21,6	3,787	466,56	42,034
11	4,5	21	-1,346	-18,6	1,812	345,96	25,036
12	4,3	21	-1,546	-18,6	2,390	345,96	28,756
13	4,6	23	-1,246	-16,6	1,553	275,56	20,684
14	5,8	45	-0,046	5,4	0,002	29,16	-0,248
15	9,2	84	3,354	44,4	11,249	1971,36	148,918
16	6,5	39	0,654	-0,6	0,428	0,36	-0,392
17	7,0	37	1,154	-2,6	1,332	6,76	-3,000
18	5,2	30	-0,646	-9,6	0,417	92,16	6,202
19	3,8	17	-2,046	-22,6	4,186	510,76	46,240
20	3,7	16	-2,146	-23,6	4,605	556,96	50,646
21	4,4	22	-1,446	-17,6	2,091	309,76	25,450
22	7,1	53	1,254	13,4	1,573	179,56	16,804
23	5,1	28	-0,746	-11,6	0,557	134,56	8,654
24	5,0	27	-0,846	-12,6	0,716	158,76	10,660
25	15,6	172	9,754	132,4	95,141	17529,76	1291,430
26	5	33	-0,846	-6,6	0,716	43,56	5,584
27	4,4	24	-1,446	-15,6	2,091	243,36	22,558
28	4,5	25	-1,346	-14,6	1,812	213,16	19,652

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8
29	3	12	-2,846	-27,6	8,100	761,76	78,550
30	4,2	19	-1,646	-20,6	2,709	424,36	33,908
31	4,9	27	-0,946	-12,6	0,895	158,76	11,920
32	7,5	61	1,654	21,4	2,736	457,96	35,396
33	4,5	24	-1,346	-15,6	1,812	243,36	20,998
34	7,8	68	1,954	28,4	3,818	806,56	55,494
35	8,9	83	3,054	43,4	9,327	1883,56	132,544
36	4,8	29	-1,046	-10,6	1,094	112,36	11,088
37	3,8	16	-2,046	-23,6	4,186	556,96	48,286
38	6,4	34	0,554	-5,6	0,307	31,36	-3,102
39	6	41	0,154	1,4	0,024	1,96	0,216
40	6,9	44	1,054	4,4	1,111	19,36	4,638
41	7,1	36	1,254	-3,6	1,573	12,96	-4,514
42	5,0	27	-0,846	-12,6	0,716	158,76	10,660
43	7,3	55	1,454	15,4	2,114	237,16	22,392
44	8,1	74	2,254	34,4	5,081	1183,36	77,538
45	5,2	33	-0,646	-6,6	0,417	43,56	4,264
46	7,1	46	1,254	6,4	1,573	40,96	8,026
47	10,8	92	4,954	52,4	24,542	2745,76	259,590
48	3,5	15	-2,346	-24,6	5,504	605,16	57,712
49	4	18	-1,846	-21,6	3,408	466,56	39,874
50	5,1	30	-0,746	-9,6	0,557	92,16	7,162
	$\bar{x}$	$\bar{y}$	$\sum (x_i - \bar{x})^2$		$\sum (y_i - \bar{y})^2$		
	5,846	39,6	232,884		41792		

Таблица 3

Расчетные значения для определения коэффициента корреляции между параметрами x_2 и y

№ экз.	x	y	$x_i - \bar{x}$	$y_i - \bar{y}$	$(x_i - \bar{x})^2$	$(y_i - \bar{y})^2$	$(x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})$
1	2	3	4	5	6	7	8
1	1,3	20	-0,719	-19,6	0,517	384,16	14,088
2	2,9	38	0,881	-1,6	0,777	2,56	-1,410
3	1,1	12	-0,919	-27,6	0,844	761,76	25,359
4	2,1	47	0,081	7,4	0,007	54,76	0,601
5	1,72	31	-0,299	-8,6	0,089	73,96	2,570
6	1,6	26	-0,419	-13,6	0,175	184,96	5,696
7	1,8	116	-0,219	76,4	0,048	5836,96	-16,716
8	1,73	35	-0,289	-4,6	0,083	21,16	1,328
9	2,4	36	0,381	-3,6	0,145	12,96	-1,372
10	1,3	18	-0,719	-21,6	0,517	466,56	15,526
11	1,4	21	-0,619	-18,6	0,383	345,96	11,510
12	1,4	21	-0,619	-18,6	0,383	345,96	11,510
13	1,5	23	-0,519	-16,6	0,269	275,56	8,612
14	1,7	45	-0,319	5,4	0,102	29,16	-1,722
15	2,9	84	0,881	44,4	0,777	1971,36	39,125
16	2,6	39	0,581	-0,6	0,338	0,36	-0,349
17	2,8	37	0,781	-2,6	0,610	6,76	-2,031
18	1,75	30	-0,269	-9,6	0,072	92,16	2,580
19	1,2	17	-0,819	-22,6	0,670	510,76	18,505
20	1,2	16	-0,819	-23,6	0,670	556,96	19,324
21	1,3	22	-0,719	-17,6	0,517	309,76	12,651

Окончание табл. 3

1	2	3	4	5	6	7	8
22	2,6	53	0,581	13,4	0,338	179,56	7,788
23	1,6	28	-0,419	-11,6	0,175	134,56	4,858
24	1,5	27	-0,519	-12,6	0,269	158,76	6,537
25	3,5	172	1,481	132,4	2,194	17529,76	196,111
26	2,8	33	0,781	-6,6	0,610	43,56	-5,156
27	1,71	24	-0,309	-15,6	0,095	243,36	4,817
28	1,8	25	-0,219	-14,6	0,048	213,16	3,194
29	1	12	-1,019	-27,6	1,038	761,76	28,119
30	1,56	19	-0,459	-20,6	0,210	424,36	9,451
31	1,6	27	-0,419	-12,6	0,175	158,76	5,277
32	2,8	61	0,781	21,4	0,610	457,96	16,718
33	1,62	24	-0,399	-15,6	0,159	243,36	6,221
34	2,78	68	0,761	28,4	0,579	806,56	21,618
35	2,96	83	0,941	43,4	0,886	1883,56	40,848
36	1,7	29	-0,319	-10,6	0,102	112,36	3,379
37	1,4	16	-0,619	-23,6	0,383	556,96	14,604
38	2,5	34	0,481	-5,6	0,232	31,36	-2,695
39	2,5	41	0,481	1,4	0,232	1,96	0,674
40	2,81	44	0,791	4,4	0,626	19,36	3,481
41	1,74	36	-0,279	-3,6	0,078	12,96	1,004
42	1,72	27	-0,299	-12,6	0,089	158,76	3,765
43	2,9	55	0,881	15,4	0,777	237,16	13,570
44	2,8	74	0,781	34,4	0,610	1183,36	26,873
45	2,3	33	0,281	-6,6	0,079	43,56	-1,856
46	2,81	46	0,791	6,4	0,626	40,96	5,064
47	3,2	92	1,181	52,4	1,395	2745,76	61,895
48	1,5	15	-0,519	-24,6	0,269	605,16	12,762
49	1,63	18	-0,389	-21,6	0,151	466,56	8,398
50	1,9	30	-0,119	-9,6	0,014	92,16	1,140
	$\bar{x}$	$\bar{y}$	$\sum (x_i - \bar{x})^2$		$\sum (y_i - \bar{y})^2$		
	2,0188	39,6	21,043		41792		

Подставим вычисленные значения в формулу (3) и определим значения коэффициентов корреляции для взаимосвязи y и x_1 , y и x_2 . Они будут соответственно равны 0,9187 и 0,7079. После введения поправки значения выборочных коэффициентов составят

$$r_1' = 0,92 \text{ и } r_2' = 0,71. \quad (5)$$

Значение выборочных коэффициентов линейной корреляции Пирсона свидетельствует о сильной связи параметров. Так как такой коэффициент является выборочной характеристикой, то необходимо оценить его значимость. Выдвинем нулевую гипотезу h_0 , которая заключается в отсутствии линейной корреляционной связи между исследуемыми переменными в генеральной совокупности ($\rho = 0$). Альтернативной гипотезой h_1 является утверждение о том, что генеральный коэффициент корреляции ρ отличен от нуля ($\rho \neq 0$).

Так как объем выборки равен 50, то для проверки гипотезы об отсутствии корреляции между параметрами y и x_1 , y и x_2 воспользуемся преобразованием Фишера [13]:

$$u = \frac{1}{2} \ln \frac{1+r'}{1-r'}. \quad (6)$$

Проверка гипотезы заключается в сравнении вычисленного значения u с критическим значением, вычисляемым по формуле

$$u_\alpha = z_{1-\alpha/2} \frac{1}{\sqrt{n-3}}, \quad (7)$$

где $z_{1-\alpha/2}$ – квантили нормированного распределения (для $\alpha = 0,05$ $z_{1-\alpha/2} = 1,96$, для $\alpha = 0,01$ $z_{1-\alpha/2} = 2,576$).

Подставив необходимые значения в формулы (6) и (7), получим для взаимосвязи y и x_1 $u = 1,5905$, для взаимосвязи y и x_2 $u = 0,8905$, $u_{0.05} = 0,286$, $u_{0.01} = 0,3758$.

На рис. 3 и 4 показано графическое представление значений на оси u для взаимосвязи y и x_1 , y и x_2 соответственно.

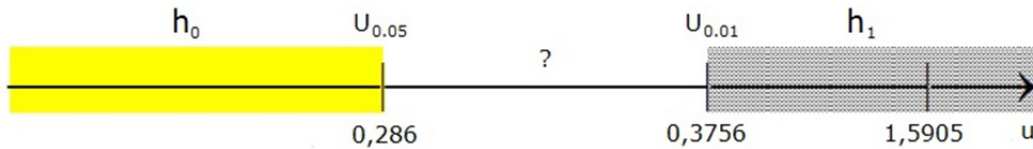


Рис. 3. Графическое представление значений на оси u для взаимосвязи y и x_1

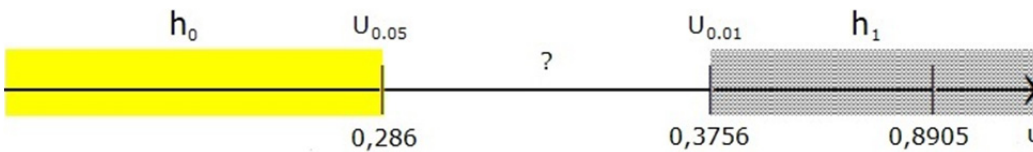


Рис. 4. Графическое представление значений на оси u для взаимосвязи y и x_2

По рис. 3 и 4 видно, что вычисленное значение попадает в критическую область $|u| > u_{0.01}$, т.е. гипотеза h_1 не отвергается, а значит, корреляция между переменными считается значимой.

Для оценки генерального коэффициента линейной корреляции Пирсона необходимо вычислить границы доверительного интервала r_1 и r_2 по формулам [3]

$$r_1 = \frac{e^{2 \cdot u_1} - 1}{e^{2 \cdot u_1} + 1}; \quad (8)$$

$$r_2 = \frac{e^{2 \cdot u_2} - 1}{e^{2 \cdot u_2} + 1}, \quad (9)$$

где $u_1 = u - u_{0.05}$, $u_2 = u + u_{0.05}$.

Подставив необходимые значения в формулы (8) и (9), для взаимосвязи y и x_1 получим $r_1 = 0,8629$, $r_2 = 0,9542$; для взаимосвязи y и x_2 получим $r_1 = 0,5403$, $r_2 = 0,8264$.

Таким образом, с доверительной вероятностью равной 95 % генеральные коэффициенты линейной корреляции Пирсона для взаимосвязей y и x_1 , y и x_2 лежат в границах

$$0,863 < \rho < 0,954; \quad (10)$$

$$0,54 < \rho < 0,826. \quad (11)$$

Значения генерального коэффициента корреляции для взаимосвязи y и x_1 сигнализируют о сильной корреляционной связи, а для взаимосвязи y и x_2 – об умеренной и сильной связи.

Определим, целесообразно ли использовать два параметра в качестве информативных. Для этого необходимо определить степень связи между указанными параметрами. Если связь сильная (коэффициент корреляции более 0,3), то следует использовать один параметр с наибольшим коэффициентом корреляции между y и x , так как второй информативный параметр влияет на прогнозируемый. Допустим, что между параметрами x_1 и x_2 существует линейная взаимосвязь, тогда для оценки этой взаимосвязи найдем значение коэффициента корреляции Пирсона, используя формулу (3) и (4).

В табл. 4 приведены расчетные значения для определения коэффициента корреляции между параметрами x_1 и x_2 .

Таблица 4

Расчетные значения для определения коэффициента корреляции между параметрами x_1 и x_2

№ экз.	x_1	x_2	$x_{1i} - \bar{x}_1$	$x_{2i} - \bar{x}_2$	$(x_{1i} - \bar{x}_1)^2$	$(x_{2i} - \bar{x}_2)^2$	$(x_{1i} - \bar{x}_1) \cdot (x_{2i} - \bar{x}_2)$
1	4,3	1,3	-1,546	-0,719	2,390	0,517	1,111
2	7,2	2,9	1,354	0,881	1,833	0,777	1,193
3	3,2	1,1	-2,646	-0,919	7,001	0,844	2,431
4	6,6	2,1	0,754	0,081	0,569	0,007	0,061
5	5,3	1,72	-0,546	-0,299	0,298	0,089	0,163
6	4,7	1,6	-1,146	-0,419	1,313	0,175	0,480
7	6,7	1,8	0,854	-0,219	0,729	0,048	-0,187
8	6,2	1,73	0,354	-0,289	0,125	0,083	-0,102
9	6,6	2,4	0,754	0,381	0,569	0,145	0,287
10	3,9	1,3	-1,946	-0,719	3,787	0,517	1,399
11	4,5	1,4	-1,346	-0,619	1,812	0,383	0,833
12	4,3	1,4	-1,546	-0,619	2,390	0,383	0,957
13	4,6	1,5	-1,246	-0,519	1,553	0,269	0,646
14	5,8	1,7	-0,046	-0,319	0,002	0,102	0,015
15	9,2	2,9	3,354	0,881	11,249	0,777	2,956
16	6,5	2,6	0,654	0,581	0,428	0,338	0,380
17	7	2,8	1,154	0,781	1,332	0,610	0,902
18	5,2	1,75	-0,646	-0,269	0,417	0,072	0,174
19	3,8	1,2	-2,046	-0,819	4,186	0,670	1,675
20	3,7	1,2	-2,146	-0,819	4,605	0,670	1,757
21	4,4	1,3	-1,446	-0,719	2,091	0,517	1,039
22	7,1	2,6	1,254	0,581	1,573	0,338	0,729
23	5,1	1,6	-0,746	-0,419	0,557	0,175	0,312
24	5	1,5	-0,846	-0,519	0,716	0,269	0,439
25	15,6	3,5	9,754	1,481	95,141	2,194	14,448
26	5	2,8	-0,846	0,781	0,716	0,610	-0,661
27	4,4	1,71	-1,446	-0,309	2,091	0,095	0,447
28	4,5	1,8	-1,346	-0,219	1,812	0,048	0,295
29	3	1	-2,846	-1,019	8,100	1,038	2,900
30	4,2	1,56	-1,646	-0,459	2,709	0,210	0,755
31	4,9	1,6	-0,946	-0,419	0,895	0,175	0,396
32	7,5	2,8	1,654	0,781	2,736	0,610	1,292
33	4,5	1,62	-1,346	-0,399	1,812	0,159	0,537
34	7,8	2,78	1,954	0,761	3,818	0,579	1,487
35	8,9	2,96	3,054	0,941	9,327	0,886	2,874
36	4,8	1,7	-1,046	-0,319	1,094	0,102	0,333
37	3,8	1,4	-2,046	-0,619	4,186	0,383	1,266
38	6,4	2,5	0,554	0,481	0,307	0,232	0,267
39	6	2,5	0,154	0,481	0,024	0,232	0,074
40	6,9	2,81	1,054	0,791	1,111	0,626	0,834
41	7,1	1,74	1,254	-0,279	1,573	0,078	-0,350
42	5	1,72	-0,846	-0,299	0,716	0,089	0,253
43	7,3	2,9	1,454	0,881	2,114	0,777	1,281
44	8,1	2,8	2,254	0,781	5,081	0,610	1,761
45	5,2	2,3	-0,646	0,281	0,417	0,079	-0,182
46	7,1	2,81	1,254	0,791	1,573	0,626	0,992
47	10,8	3,2	4,954	1,181	24,542	1,395	5,852
48	3,5	1,5	-2,346	-0,519	5,504	0,269	1,217
49	4	1,63	-1,846	-0,389	3,408	0,151	0,718
50	5,1	1,9	-0,746	-0,119	0,557	0,014	0,089
	$\bar{x}_1$	$\bar{x}_2$	$\sum (x_{1i} - \bar{x}_1)^2$		$\sum (x_{2i} - \bar{x}_2)^2$		
	5,846	2,0188	232,884		21,043		

Таким образом, подставляя вычисленные значения в формулу (3), получим значение выборочного коэффициента корреляции для взаимосвязи x_1 и x_2 . Оно будет равно 0,8403. После введения поправки коэффициент будет равен

$$r' = 0,8. \quad (12)$$

Подставляя значения в формулу (6), получим $u = 1,2312$.

Выдвинем нулевую гипотезу h_0 , которая заключается в отсутствии линейной корреляционной связи между исследуемыми переменными в генеральной совокупности ($\rho = 0$). Альтернативной гипотезой h_1 является утверждение о том, что генеральный коэффициент корреляции ρ отличен от нуля ($\rho \neq 0$).

Подставляя значения в формулу (6), получим $u = 1,2312$.

На рис. 5 дано графическое представление значений на оси u для взаимосвязи x_1 и x_2 .

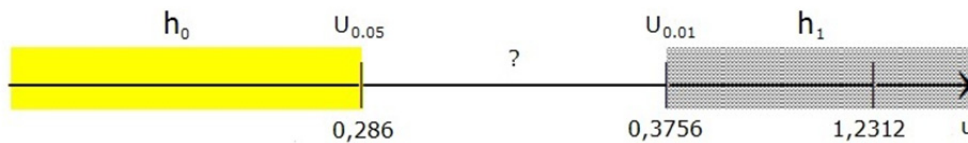


Рис. 5. Графическое представление значений на оси u для взаимосвязи x_1 и x_2

По рис. 5 видно, что вычисленное значение попадает в критическую область $|u| > u_{0,01}$, т.е. гипотеза h_1 не отвергается, значит, корреляция между переменными считается значимой.

Подставляя значения в формулы (8) и (9), получим границы доверительного интервала $r_1 = 0,7376$, $r_2 = 0,9082$.

Таким образом, с доверительной вероятностью равной 95 % генеральный коэффициент линейной корреляции Пирсона для взаимосвязи x_1 и x_2 лежит в границах

$$0,738 < \rho < 0,908. \quad (13)$$

Выводы

Предложена методика отбора информативных параметров. По результатам обучающего эксперимента определены значения прогнозируемого параметра и коэффициентов корреляции. Проведенные исследования показали, что полученные значения генерального коэффициента линейной корреляции Пирсона свидетельствуют о сильной корреляционной связи между параметрами x_1 и x_2 . Таким образом, вторичный отбор проходит только параметр x_1 , который можно рекомендовать в качестве информативного для проведения индивидуального прогнозирования.

Библиографический список

1. Грущанский, В. А. О формализации показателей эффективности и безопасности комплексных программ в условиях неопределенности и риска / В. А. Грущанский, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 2. – С. 3–9.
2. Северцев, Н. А. Системный анализ определения параметров состояния и параметры наблюдения объекта для обеспечения безопасности / Н. А. Северцев // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 1. – С. 4–10.
3. Юрков, Н. К. Оценка безопасности сложных технических систем / Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 2. – С. 15–21.
4. Тюлевин, С. В. К проблеме прогнозирования показателей качества элементов космической аппаратуры / С. В. Тюлевин, М. Н. Пиганов, Е. С. Еранцева // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 1 (5). – С. 9–17.
5. Mishanov, R. Individual forecasting of quality characteristics by an extrapolation method for the stabilizers and the integrated circuits / R. Mishanov, M. Piganov // The experience of designing and application of CAD systems in Microelectronics (CADSM 2015) : Proceeding XIII international conference. – Ukraine, Lviv, 2015. – P. 242–244.

6. Piganov, M. Individual prognosis of quality indicators of space equipment elements / M. Piganov, S. Tyulevin, E. Erantseva // The experience of designing and application of CAD systems in microelectronics (CADSM 2015) : Proceeding XIII international conference. – Ukraine, Lviv, 2015. – P. 367–371.
7. Тюлевин, С. В. Структурная модель индивидуального прогнозирования параметров космической аппаратуры / С. В. Тюлевин, М. Н. Пиганов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2008. – Вып.1. – С. 92–96.
8. Пиганов, М. Н. Прогнозирование надежности радиоэлектронных средств / М. Н. Пиганов, С. В. Тюлевин // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер.: Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2009. – Вып.1. – С. 175–182.
9. Пиганов, М. Н. Индивидуальное прогнозирование показателей качества элементов и компонентов микросборок / М. Н. Пиганов. – М. : Новые технологии, 2002. – 267 с.
10. Мишанов, Р. О. Разработка прогнозной модели качества полупроводниковых приборов методом экстраполяции / Р. О. Мишанов, М. Н. Пиганов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2014. – Т. 6, № 4 (3). – С. 594–599.
11. Пиганов, М. Н. Экспертные оценки в управлении качеством радиоэлектронных средств : учеб. пособие / М. Н. Пиганов, Г. А. Подлипов. – Самара : Изд-во СГАУ, 2004. – 122 с.
12. Бурова, Д. Н. Корреляционный алгоритм определения параметров, прогнозирующих надежность интегральных схем / Д. Н. Бурова, А. И. Коекин, Г. Т. Софинский // Электронная техника. Сер. 3: Микроэлектроника. – 1972. – Вып. 4. – С. 58–61.
13. Харченко, М. А. Корреляционный анализ : учеб. пособие для вузов / М. А. Харченко. – Изд-во: ИПЦ ВГУ, 2008. – 31 с.
14. Жаднов, В. В. Сравнительный анализ методов оценки надежности полупроводниковых интегральных микросхем / В. В. Жаднов // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. – 2013. – № 16. – С. 132–137.
15. Урличич, Ю. М. Дополнительные отбраковочные испытания современной космической электронной компонентной базы / Ю. М. Урличич, Н. С. Данилин, Д. А. Чернов // Современная электроника. – 2007. – № 2. – С. 8–11.
16. Садыхов, Г. С. Оценка вероятности безотказного срабатывания объекта при высоких уровнях безотказности / Г. С. Садыхов, А. А. Артюхов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2015. – Т. 1. – С. 37–38.
17. Гришин, А. Ф. Статистические модели: построение, оценка, анализ : учеб. пособие / А. Ф. Гришин, Е. В. Кочерова. – М. : Финансы и статистика, 2005. – 416 с.

Мишанов Роман Олегович

аспирант,
Самарский национальный исследовательский
университет им. академика С. П. Королева
(443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34)
E-mail: mishanov91@bk.ru

Пиганов Михаил Николаевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра конструирования и технологии
электронных систем и устройств,
Самарский национальный исследовательский
университет им. академика С. П. Королева
(443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34)
E-mail: kipres@ssau.ru

Mishanov Roman Olegovich

postgraduate student,
Samara National Research University
named after academician S. P. Korolev
(443086, 34 Moscow highway, Samara, Russia)

Piganov Mikhail Nikolaevich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of construction and technology
of electronic systems and devices department,
Samara National Research University
named after academician S. P. Korolev
(443086, 34 Moscow highway, Samara, Russia)

Аннотация. Рассматривается методика определения набора информативных параметров для индивидуального прогнозирования надежности и качества радиоэлектронных средств космического назначения методами теории распознавания образов. Для отбора информативных параметров использован корреляционный и регрессионный анализ. Определены коэффициенты корреляции между прогнозируемым и информативными параметрами, а также

Abstract. The technique of determination of a set of the informative parameters for personal prediction of reliability and quality of radio-electronic means of space assignment is considered by methods of the theory of image identification. For selection of the informative parameters are used correlation and regression analysis. Correlation coefficients between predicted and the informative parameters, and also between the informative parameters are defined. Correction of correlation coeffi-

между информативными параметрами. Проведена коррекция коэффициентов корреляции. Выявлен наиболее информативный параметр.

Ключевые слова: надежность, качество, безопасность, радиоэлектронные средства, индивидуальное прогнозирование, информативные параметры, методика, микросхема, прогнозируемый параметр, космическая техника, корреляция, регрессия.

cients is carried out. The most informative parameter is revealed.

Key words: reliability, quality, safety, radio-electronic means, personal prediction, the informative parameters, technique, chip, the predicted parameter, space engineering, correlation, regression.

УДК 621.382

Мишанов, Р. О.

Методика определения набора информативных параметров для проведения индивидуального прогнозирования показателей качества и надежности радиоэлектронных средств / Р. О. Мишанов, М. Н. Пиганов // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 1 (17). – С. 93–104. DOI 10.21685/2307-4205-2017-1-12.