

Предисловие Дзиркала Э.В. к статье Демидовича Н.О.

Последовательный контроль надёжности (и других подобных параметров) сводится к тому, что в каждый момент наблюдений некоторая величина примеряется к двум границам: приёмки и браковки. Между границами – область неопределённости (при попадании туда испытания продолжают). Классический последовательный метод А.Вальда не предполагает каких-либо ограничений по времени испытаний. Как только область неопределённости Вальда усекают – заметно возрастают риски поставщика и потребителя. И неизвестно, на каком уровне эту область усекать – тут полный произвол. Например, задаются риски по 0,1, а получаются 0,13 (а что получается – кое-кто может оценить, в т.ч. и Демидович Н.О. своим методом).

Демидович Н.О. разработал метод, позволяющий подобрать границы так, что последовательный контроль с их использованием обеспечит точные значения заданных рисков. Границы по методу Демидовича Н.О. могут образовывать область неопределённости любой формы, в т.ч. замкнутую, не требующую усечения (сам он принял при разработке треугольную). Метод признан специалистами ИСО/МЭК, узаконен в РФ стандартом ГОСТ Р 27.402-95 и вошёл во вторую редакцию проекта международного стандарта ИЕС 61124, подготавливаемую к выпуску.

Отметим, что ещё раньше Демидовича в СССР появились планы Ярлыкова Н.Е. с теми же преимуществами.

Ясно, что планы Демидовича заведомо лучше «классических» планов Вальда, и последние следует заменить во всех стандартах и учебниках. Ниже приводятся две первые статьи Демидовича Н.О. из журнала «Надёжность и контроль качества» за 1990 и 1991 гг.

С. 26 ГОСТ 27.410–87

Т а б л и ц а 17

$$\alpha = \beta = 0,1; T_{\alpha}/T_{\beta} = 2; t'_{\Sigma\alpha}/T_{\alpha} = 5,91; t'_{\Sigma\beta}/T_{\alpha} = 5,00$$

r	$t_{\Sigma\alpha}/T_{\alpha}$	$t_{\Sigma\beta}/T_{\alpha}$	r	$t_{\Sigma\alpha}/T_{\alpha}$	$t_{\Sigma\beta}/T_{\alpha}$	r	$t_{\Sigma\alpha}/T_{\alpha}$	$t_{\Sigma\beta}/T_{\alpha}$
0	1,907	—	14	11,884	7,140	28	20,413	17,766
1	2,860	0,015	15	12,513	7,854	29	21,006	18,563
2	3,695	0,183	16	13,137	8,577	30	21,598	19,363
3	4,473	0,507	17	13,758	9,309	31	22,188	20,166
4	5,217	0,929	18	14,376	10,049	32	22,775	20,973
5	5,936	1,417	19	14,990	10,796	33	23,363	21,781
6	6,636	1,953	20	15,602	11,549	34	23,949	22,594
7	7,322	2,525	21	16,211	12,309	35	24,533	23,408
8	7,997	3,128	22	16,817	13,074	36	25,117	24,227
9	8,663	3,755	23	17,422	13,846	37	25,699	25,045
10	9,319	4,401	24	18,023	14,621	38	—	25,699
11	9,969	5,065	25	18,624	15,400			
12	10,612	5,744	26	19,223	16,186			
13	11,251	6,436	27	19,818	16,975			

1. М. Б. Фарберман, Р. Д. Берштин, С. С. Дмитриченко «Планирование объемов последовательных испытаний деталей машин на долговечность». Вестник машиностроения, № 8, 1987, С. 3–6.

2. Harter H. L., Moore A. H. An Evaluation of Exponential and Weibull Test Plans IEEE Transactions on Reliability, Vol R–25, N 2, June 1976, p. 100–104.

3. Надёжность технических систем: Спр. Ю. К. Беляев, В. А. Богатырев, В. В. Болотин и др. Под ред. И. А. Ушакова. М.: Радио и связь, 1985.

Планы контроля средних показателей надежности по последовательному методу для экспоненциального распределения

T_{α}/T_{β}	a	r_0	r_{yc}	t_0/T_{α}	t'_{Σ}/T_{α}
$\alpha = \beta = 0,10$					
21,70	6,74	0,713	1	0,106	0,099
7,30	3,17	1,110	2	0,349	0,408
5,00	2,49	1,370	3	0,549	0,735
4,83	2,43	1,400	3	0,574	0,780
4,00	2,16	1,590	4	0,732	1,090
3,83	2,11	1,640	4	0,776	1,180
3,50	2,00	1,750	5	0,879	1,410
3,29	1,92	1,850	5	0,960	1,600
3,00	1,82	2,000	6	1,100	1,960
2,94	1,80	2,040	6	1,130	2,040
2,70	1,71	2,210	7	1,290	2,480
2,53	1,65	2,380	8	1,440	2,940
2,50	1,64	2,400	9	1,460	3,010
2,39	1,60	2,520	9	1,580	3,380

Продолжение табл. 5

T_{α}/T_{β}	a	r_0	r_{yc}	t_0/T_{α}	t_{Σ}/T_{α}
2,28	1,55	2,660	10	1,710	3,840
2,19	1,52	2,810	11	1,840	4,310
2,12	1,49	2,930	12	1,970	4,780
2,06	1,47	3,050	13	2,080	5,240
2,00	1,44	3,160	15	2,190	5,690
1,96	1,42	3,280	15	2,310	6,200
1,79	1,36	3,770	20	2,770	8,420
1,67	1,31	4,270	25	3,270	11,100
1,60	1,28	4,660	30	3,650	13,400
1,50	1,23	5,420	40	4,390	18,600

2,0, 0,1=0,1, 1,44 и 3,16, приёмка 1,44к – 3,16 = 1,44*10 – 3,16 = 11,24, браковка 17,56

Демидович Н.О.

КРИТЕРИИ КАЧЕСТВА ПЛАНОВ КОНТРОЛЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БЕЗОТКАЗНОСТИ

Для контроля таких показателей безотказности, как наработка на отказ восстанавливаемых или средняя наработка до отказа невосстанавливаемых изделий, в нормативной литературе [1,2] регламентированы два основных вида планов, применяемых обычно в предположении об экспоненциальном распределении соответствующих случайных величин – наработок между отказами или до отказа: планы ограниченной продолжительности или с ограниченным числом отказов (вида I) и усеченные последовательные планы Вальда (вида II).

Далее будут рассматриваться планы с заменой или восстановлением отказавших изделий, однако результаты могут быть отнесены и к планам без замены (восстановления).

В качестве критериев при выборе планов руководствуются максимальной продолжительностью испытаний (у планов вида I она является минимальной) или средней продолжительностью (у планов вида II она близка к минимальной «с точностью до усечения»).

При усечении последовательных планов возрастают значения риска сторон по сравнению с номинальными. Такое увеличение может быть существенным (до 30 % и более) и им не всегда следует пренебрегать.

Наряду с указанными рассмотрим также другие критерии качества планов испытаний, которые упускают из виду при теоретических исследованиях, но они значимы для практики. Предварительно отметим, что из сопоставления границ планов видов I и II (рис. 1), можно сделать вывод о наличии в планах вида I «пустых» областей, слабо влияющих на формирование ошибочных решений. Такие области (верхняя и нижняя) на рисунке заштрихованы. Они характеризуются тем, что ступенчатые линии реализации процесса отказов, попавшие в эти области, выходят на соответствующие границы плана вида I с вероятностью, близкой к единице, при любой из гипотез.

Наиболее существенное обстоятельство, требующее учета при построении планов испытаний, состоит в том, что практически все виды изделий, наработки между отказами или до отказа которых аппроксимируют экспоненциальным распределением, имеют период приработки. В стандартизованных планах это не учитывается. Период приработки может меняться как по продолжительности, так и по характеру в зависимости от состояния технологического процесса и пр. Наличие приработки приводит к тому, что моменты возникновения отказов распределяются неравномерно по продолжительности испытаний, как это должно быть в случае экспоненциального распределения, а в большей степени концентрируются на начальном этапе испытаний. При этом линии реализации

процесса отказов вместо прямолинейного характера приобретают тенденцию к изгибу, выпуклой частью направленному к границе несоответствия плана вида II, пересекают ее, а впоследствии выходят на границу соответствия планов видов I и II так, как это показано на рис. 1. В результате неконтролируемым образом увеличивается риск изготовителя, когда приемлемая по надежности продукция может быть забракована. Указанное обстоятельство препятствует широкому применению планов вида II на практике, несмотря на их экономическую выгодность.

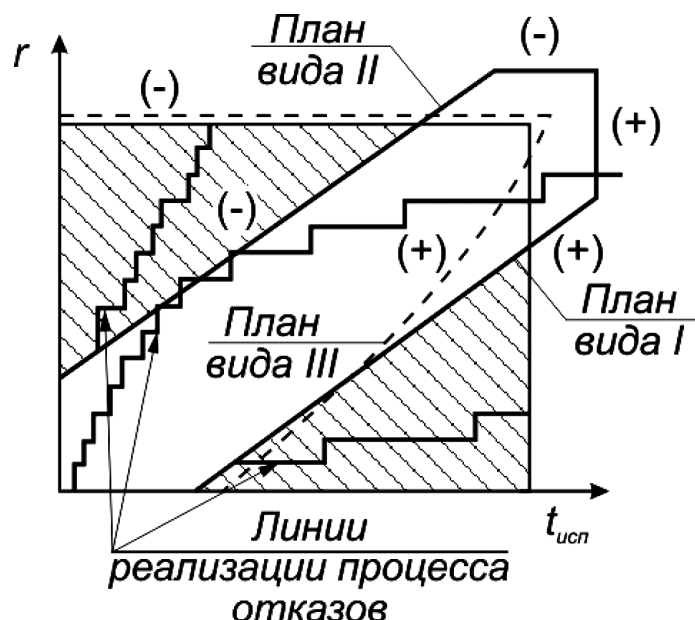


Рис. 1. Сопоставление границ планов испытаний различных видов. Заштрихованы области плана вида I, незначительно влияющие на значения риска сторон. Знаком (+) обозначены границы соответствия, границы несоответствия планов

Планы вида I являются нечувствительными к возможным приработкам, так как граница несоответствия в них представляет прямую, параллельную оси абсцисс. Другими словами можно сказать, что из двух заштрихованных на рис. 1 областей нижняя область всегда остается пустой, а верхняя в случае приработки таковой не является.

Приведенные рассуждения обосновывают целесообразность рассмотрения альтернативно планам вида II новых последовательных планов (вида III), которые получают не путем усечения вальдовских планов, а за счет исключения из соответствующих планов вида I нижней заштрихованной области. Общий характер границ таких планов показан на рис. 1 штриховой линией. Они, как будет показано дальше, сочетают в себе достоинства планов I и II и не имеют их недостатков.

Сохранение верхней области по существу означает задание одной из границ плана (несоответствия), что приводит к необходимости более детального осмысления такой характеристики, как средняя продолжительность испытаний. В этом отношении следует представлять реальное отношение сторон к продолжительности испытаний, имея в виду их возможное завершение с двумя противоположными итогами.

Изготовителю не свойственно стремление быстро завершать испытания с отрицательным итогом, в то время когда предусмотрена их большая продолжительность и можно ожидать улучшения результатов, т.е. он не склонен “преждевременно” принимать решение о несоответствии, несмотря на то, что несет расходы по проведению испытаний. Интересы потребителя в этом отношении оказываются чаще всего нейтральными, либо он также испытывает неудобства, связанные с принятием отрицательного решения, так как это может повлечь задержку поставки и т.п. Поэтому вместо средней продолжительности по всем (положительным и отрицательным) решениям следует

рассматривать также в качестве характеристики плана и среднюю продолжительность испытаний только по положительно принимаемым решениям (о соответствии). Такая характеристика плана в большей степени отражает реальные интересы сторон.

Применение ее вместо обычной средней продолжительности имеет еще и техническое преимущество, так как все сложности вычислительного характера при определении средней продолжительности плана связаны именно с отрицательно принимаемыми решениями. Функции распределения продолжительности испытаний до принятия отрицательного решения сложны, а приближенные формулы малоэффективны.

В случаях принятия положительного решения средняя продолжительность испытаний определяется просто

$$T_{cp} = \frac{\sum_{i=0}^{r_{np}} p_i t_i}{\sum_{i=0}^{r_{np}} p_i},$$

где p_i – вероятность окончания испытаний с i отказами;
 t_i – продолжительность испытаний при i отказах;
 r_{np} – предельно допустимое число отказов, по достижении которого принимают решение о несоответствии.

Идея построения боковой границы плана вида III состоит в следующем. Любой произвольной ее форме (набору значений $\{t_i\}$) соответствует свой набор вероятностей $\{p_i\}$ и наоборот, совокупность численных значений вероятностей $\{p_i\}$, заданных при произвольном фиксированном значении наработки на отказ T_0 , однозначно определяет боковую границу плана – совокупность значений $\{t_i\}$.

При справедливости основной гипотезы ($T_0 = T_\alpha$) сумма вероятностей равна дополнению до единицы риска изготовителя:

$$\sum_{i=0}^{r_{np}-1} p_i(T_\alpha) = 1 - \alpha,$$

а при справедливости альтернативы ($T_0 = T_\beta$) сумма этих вероятностей равна риску потребителя:

$$\sum_{i=0}^{r_{np}-1} p_i(T_\beta) = 1 - \beta.$$

Если положить значение наработки на отказ (средней наработки до отказа) равным браковочному уровню T_β и рассмотреть n наборов вероятностей $\{p_i\}_k$, $k = 1 \dots n$, таких, что их сумма равна заданному значению риска потребителя β , то каждый набор определит боковую границу плана $\{t_i\}_k$. Все n планов с такими боковыми границами соответствия и одной и той же границей несоответствия r_{np} будут иметь один и тот же риск потребителя, но разные другие параметры: риски изготовителя, максимальные и средние продолжительности и др. Число таких планов является неограниченным и среди них находится также неограниченное число планов, имеющих одинаковые риски изготовителя, т.е. множество планов, отвечающих одному набору исходных данных T_α/T_β , α , β .

Изготовителю для выбора из этого множества конкретного плана, подходящего по совокупности качественных характеристик, необходимо располагать каким-либо способом их упорядоченного перебора. В основу перебора может быть положен некоторый принцип распределения (раздачи «квот») риска потребителя β по r_{np} возможным продолжительностям испытаний. Рациональный способ такого построения и алгоритм расчета планов требует отдельного самостоятельного изложения.

На рис. 2 и в таблице, с целью дальнейшего рассмотрения критериев качества планов, даны два примера планов вида III с исходными данными, соответствующими исходным данным наиболее часто применяемого стандартизованного плана вида II: $T_a/T_\beta = 2$, $\alpha = \beta = 0,128$ (риски плана вида II больше номинальных $\alpha = \beta = 0,1$ вследствие усечения).

На рис. 3 приведены графики средней продолжительности испытаний до принятия положительного решения по сравниваемым планам. Из графиков видно, что в рабочем диапазоне возможных значений наработки на отказ (от браковочного T_β до приемочного T_a уровней) новые планы в среднем существенно менее продолжительны до принятия положительного решения, чем стандартизованный план – на 14-27%. В частности, вся боковая граница плана *a* расположена левее боковой границы стандартизованного плана.

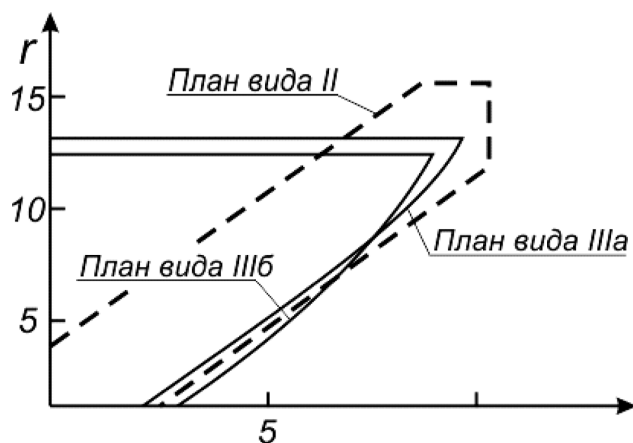


Рис. 2. Стандартный план вида II для исходных данных $T_a/T_\beta = 2$; $\alpha = \beta = 0,128$ (штриховая линия) и два соответствующих ему плана вида IIIa и IIIб (сплошные линии)

Число отказов	Границы планов видов II и III			
	II (согласно [1])		IIIa	IIIб
	(браковка)	(+, т.е. приёмка)	(+)	(+)
0	–	2,20	2,03	2,27
1	–	2,89	2,78	3,03
2	–	3,59	3,47	3,69
3	0,35	4,25	4,13	4,31
4	1,04	4,97	4,77	4,90
5	1,74	5,67	5,40	5,47
6	2,43	6,36	6,02	6,02
7	3,12	7,05	6,64	6,56

Число отказов	Границы планов видов II и III			
	II (согласно [1])		IIIa	IIIб
	(браковка)	(+, т.е. приёмка)	(+)	(+)
8	3,82	7,75	7,27	7,09
9	4,51	8,44	7,89	7,62
10	5,20	9,13	8,51	8,13
11	5,90	9,83	9,14	8,64
12	6,59	10,30	9,76	–
13	7,28	10,30	–	–
14	7,97	10,30	–	–
15	8,67	10,30	–	–

При наличии периода приработки преимущество новых планов заключается также в том, что изменяются значения вероятностей окончания испытаний при i отказах (по сравнению со значениями вероятностей, соответствующих экспоненциальному распределению) таким образом, что возрастает доля испытаний, заканчивающихся при больших значениях отказавших изделий, когда линия реализации процесса отказов пересекает боковые границы планов в их верхней части. На рис. 2 эта область границ отмечена волнистой линией, и план, обеспечивающий более быстрое окончание испытаний именно в этой части боковой границы, может быть для изготовителя наиболее предпочтительным. На рис.2 таким планом является план б. Стандартизованный план вида II в этом отношении оказывается наихудшим – боковая граница его наиболее удалена вправо.

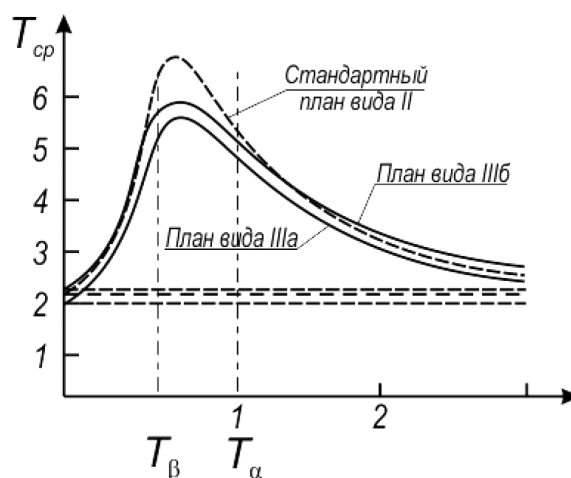


Рис. 3. Зависимость средней продолжительности испытаний до принятия положительного решения (о соответствии) $T_{ср}$ от наработки на отказ испытуемых изделий T_0 планов с исходными данными $T_d/T_β=2$; $α = β = 0,128$ в масштабе $T_α$

Аналогичные результаты получаются и при других исходных данных. Подводя итог рассмотрения критериев (характеристик) качества планов контроля показателей безотказности, необходимо сделать следующие выводы:

- изготовителя, учитывающего специфические особенности испытаний на безотказность, интересует ряд характеристик планов: максимальная продолжительность, устойчивость риска к

возможным приработкам, средняя продолжительность до принятия положительного решения, особенно в области больших значений допустимого числа отказов;

- средняя продолжительность испытаний до принятия отрицательного решения не представляет реального интереса для сторон, и как следствие, такая распространенная в теоретических исследованиях характеристика, как общая средняя продолжительность, для практики представляется наименее важной;

- задача выбора оптимального плана по совокупности указанных характеристик математически не формулируется, т.е. оптимального решения в данном случае не существует, в связи с чем эту задачу следует решать путем предоставления изготовителю возможности выбирать по своему усмотрению нужный ему план из множества планов вида III с одинаковыми исходными данными и варьируемыми, предположительно рациональными соотношениями качественных характеристик;

- планы вида III сочетают в себе преимущества стандартизованных планов видов I и II и лишены их недостатков;

- с позиций потребителя все планы вида III с одинаковыми исходными данными являются эквивалентными, обеспечивающими проверку заданных гипотез с заданными рисками сторон.

Изложенный подход с необходимыми изменениями может быть применен также и к планам без замены (восстановления) отказавших изделий или к видам распределений, отличных от экспоненциального, и (в несколько меньшей степени) к планам контроля показателей типа «вероятность».

Литература

1. Публикация МЭК 605–7. Испытание аппаратуры на надежность. Ч.7. Планы контрольных испытаний для определения интенсивности отказов и средней наработки на отказ при допущении постоянной интенсивности отказов. – М.: Изд. ВНИИ-электронстандарт, 1980.

2. ГОСТ 27.410 – 87. Надежность в технике. Методы контроля показателей надежности и планы контрольных испытаний на надежность.