

УДК 621.391

# ВЫБОР ТОПОЛОГИИ ГИБКИХ КОММУТАЦИОННЫХ ШЛЕЙФОВ ДЛЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ ТЕОРЕМЫ БАЙЕСА



[А.А. АНДРУСЕВИЧ](#), [В.А. ПАЛАГИН](#), [Е.А. РАЗУМОВ-ФРИЗЮК](#),  
[И.В. ЖАРИКОВА](#), [В.В. НЕВЛЮДОВА](#)

Харьковский национальный университет радиоэлектроники

**Abstract** – The technological processes quality ratings of telecommunication systems elements production are influenced by a large number of parameters, and high product quality level support task at the design stage is extremely difficult. For flexible board topology variant choosing it is necessary to consider features of technological process of its production for the purpose of receiving the greatest percent of accepted devices. The questions connected with modeling of technological process on the Bayesian theory basis are considered in this article. The method of flexible commutative board topology selection is presented. The experimental probability values of end products yield for all possible options on a decisions tree are taken to attention. The number of layers, type of board material and conductive wires parameters are chosen to advance high level of multilayered connecting loop fabrication quality. The described approach allows to reduce considerably design labor input for the flexible multilayered commutative structures having difficult topology.

**Анотація** – На підставі байєсівських статистичних рішень розглянуті питання вибору оптимального варіанта топології гнучких комутаційних шлейфів з метою зменшення браку під час їх виробництва. Здійснено вибір матеріалу провідників багатослоєвої плати, їх ширини та зазору між ними, а також кількості шарів в структурі гнучкого шлейфа за критерієм максимальної кількості відбракованих виробів.

**Аннотация** – На основании байесовских статистических решений рассмотрены вопросы выбора оптимального варианта топологии гибких коммутационных шлейфов с целью уменьшения брака при их производстве. Произведен выбор материала проводников многослойной платы, их ширины и зазора между ними, а также количества слоев в структуре гибкого шлейфа по критерию максимального количества отбракованных изделий.

## Введение

В последнее время наблюдается бурное развитие информационных технологий. Это развитие характеризуется постоянным ростом требований к эффективности телекоммуникационных сетей, расширением их функциональных возможностей. Одновременно с этим возникает необходимость в повышении требований к миниатюризации, эргономичности и надежности терминальных устройств. Как результат, терминальное оборудование уменьшается в своих размерах, приобретает эргономичные формы и эксплуатируется зачастую без соблюдения условий эксплуатации. Все перечисленное выдвигает новые требования к надежности терминального оборудования и требует учета этих особенностей при проектировании его конструкций.

Одним из перспективных направлений в области техники монтажа электронной аппаратуры, которое позволяет улучшить конструктивные характеристики телекоммуникационного оборудования, является использование гибких плат и кабелей. В настоящее время гибкие печатные платы в сфере телекоммуникаций применяются

для создания высокоскоростных межсоединений в аппаратуре связи, а также для обеспечения перехода от одного устройства к другому без разъемов, создающих неоднородности в линии связи.

Во многих гибких платах проще реализовать высокую плотность монтажа. К преимуществам плат и кабелей относятся способность неоднократно изгибаться и свертываться в трех плоскостях, принимать форму корпуса сложной конфигурации, малые толщины и соответственно массу, ударопрочность.

При этом гибкие печатные платы обеспечивают динамическую гибкость элементов конструкций устройств, устойчивость к вибрациям, ударам и линейным ускорениям, стабильную помехоустойчивость, улучшение эффективности и уменьшение стоимости сборки (за счет уменьшения числа операций), имея при этом высокую механическую и электрическую прочность, широкий температурный диапазон (для полиамида от минус 169 °С до плюс 200 °С), химическую стойкость и высокую радиационную устойчивость [1, 2].

Перечисленные конструкторско-технологические направления в развитии техники монтажа многослойных коммутационных плат предъявляют целый ряд специфических требований к качеству материала гибких оснований, к технологическим операциям при изготовлении плат и кабелей и их сборке.

## **I. Постановка задачи**

Надежность электронной аппаратуры во многом обеспечивается конструктивно-технологическими решениями. Повышение плотности размещения элементов соединений на единицу площади печатных плат, увеличение их абсолютного числа и уменьшение размеров усложняют задачу обеспечения надежности.

Применение гибких плат позволяет отказаться от соединительных разъемов, повысить надежность соединений, упростить монтаж и обслуживание при эксплуатации. Однако проектирование гибких многослойных шлейфов сопряжено с рядом трудностей.

Во избежание возникновения перекрестных искажений в гибком шлейфе необходимо тщательно контролировать ширину проводников и зазоры между ними. Рекомендуется также заранее оценить значения паразитных параметров, чтобы предсказать вероятность проявления связанных с ними физических эффектов на высоких частотах. Также необходимо учитывать диэлектрические свойства многослойного материала печатной платы.

Задачей, решаемой в данной статье, является разработка метода выбора топологии гибких коммуникационных шлейфов с учетом конструктивных и технологических факторов производства.

На качественные показатели технологических процессов изготовления элементов телекоммуникационных систем влияет большое количество параметров, предусмотреть которые при проектировании крайне сложно. Для поиска оптимального ва-

рианта технологического процесса или топологии изготавливаемого шлейфа, входящего в состав устройств телекоммуникационных систем, целесообразно использовать системы принятия решений.

Наиболее подходящим для решения задачи выбора оптимального варианта топологии многослойного гибкого шлейфа среди методов поиска оптимального варианта является метод байесовских статистических решений.

## II. Метод байесовских статистических решений

Метод байесовских статистических решений имеет огромное количество сфер применения: медицина, строительство, искусственный интеллект, электроника.

К достоинствам поиска оптимального варианта по теореме Байеса относятся [3]:

- простота математического аппарата теоремы Байеса;
- компенсация некомпетентности, субъективности и недостаточной информированности экспертов;
- уточнение экспертной оценки при помощи экспериментальных данных;
- высокая скорость пересчета вероятности в случае появления новой информации;
- наглядность модели за счет применения дерева решений.

Последовательность операций, требуемых для принятия решения по методу байесовских статистических решений, следующая:

- 1) Составляется список всех возможных операций  $a$ .
- 2) Составляется список всех возможных состояний  $\theta$ .
- 3) Составляется список всех возможных экспериментов  $e$ , включая нулевой  $e_0$ .
- 4) Для каждого эксперимента составляется список всех возможных результатов  $z$ .

Эти первые четыре шага эквивалентны построению дерева решений, с использованием которого выполняются следующие шаги:

5) Определяется для каждой комбинации «эксперимент, результат, операция, состояние» ее относительная желательность, т. е.  $u(e, z, a, \theta)$ . Это равносильно указанию в конце каждого пути по дереву решения численного значения выгоды.

6) Предварительное («априорное») суждение ПР об относительной вероятности различных состояний  $\theta$  выражается в виде распределения вероятностей  $P'(\theta)$ .

7) Для каждого эксперимента определяется его вероятностная характеристика в виде  $P(\theta, z | e)$ . Шаги 6 и 7 дают совместное распределение вероятностей  $P(z | \theta, e)$ .

8) Для каждой комбинации «эксперимент, результат» вычисляется апостериорное распределение  $P''(\theta | z, e)$ .

9) Определяется ожидаемая выгода от каждой операции для каждой комбинации «эксперимент, результат».

10) Для каждой комбинации «эксперимент, результат» определяется оптимальная операция и оптимальная выгода

$$u^*(e, z) = \max u^*(e, z, a). \quad (1)$$

11) Для каждого эксперимента вычисляется вероятность каждого частного результата  $z$ , задаваемого безусловным распределением  $P(z|e)$ .

12) Для каждого эксперимента определяется ожидаемая выгода  $u^*(e)$ :

$$u^*(e) = \sum_z u^*(e, z) \cdot P(z|e). \quad (2)$$

Оптимальным считается тот эксперимент  $e$ , для которого выгода  $u^*(e)$  максимальна. Поскольку здесь рассматривается также и нулевой эксперимент, может оказаться, что именно он и является оптимальным; это будет означать, что операция должна выбираться без всякого эксперимента.

### III. Выбор топологии гибкого коммуникационного шлейфа

Примером использования теории Байеса может служить разработка технологии изготовления гибкого коммутационного шлейфа и выбор его топологии, варианты которой показаны на рис. 1 [4].

Так, в нашем примере производился выбор проводникового материала гибкой структуры между медью (Cu) и алюминием (Al); ширины проводников и зазоров между ними (рассматривается три возможных варианта: ширина 75, 100 и 70 мкм при зазоре 150, 90 и 80 мкм соответственно), а также количества слоев гибкого шлейфа  $N$  (в нашем случае – от 3 до 5) и сварочных межслойных соединений  $n_{св}$ .

При выборе варианта топологии гибкого шлейфа необходимо учитывать особенности технологического процесса его изготовления с целью получения наибольшего процента выхода годных изделий.

Первым элементом, необходимым для анализа технологического процесса на основе байесовой теории решений, является дерево решений. Оно по существу представляет собой список всех возможных альтернатив выбора, имеющихся у проектировщика, и всех возможных событий, которые не находятся под его контролем, причем те и другие расположены так, что выявлена их последовательность во времени.

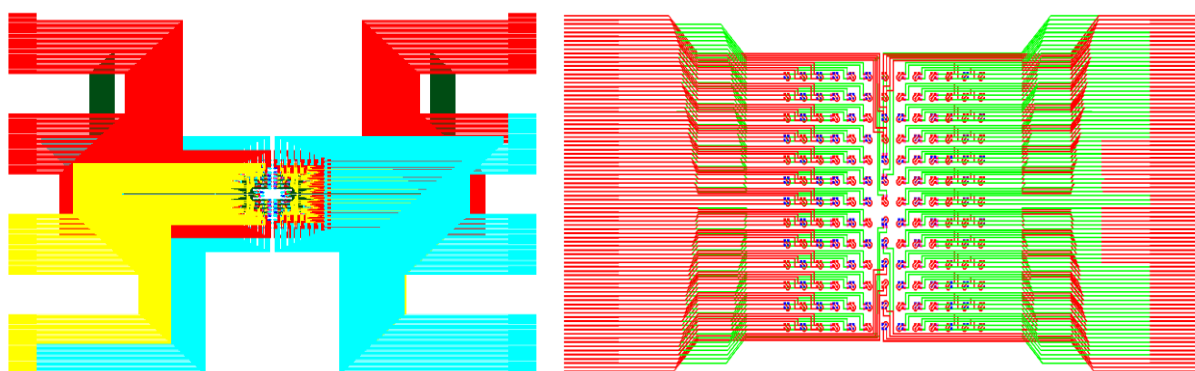


Рис. 1. Возможные топологии многослойного гибкого шлейфа

В нашем случае дерево решений представляет процесс выбора наиболее приемлемых параметров топологии гибкого шлейфа (рис. 2).

В качестве оценочного фактора для расчетов по теореме Байеса выбирается вероятность выхода годной продукции (гибких коммутационных шлейфов).

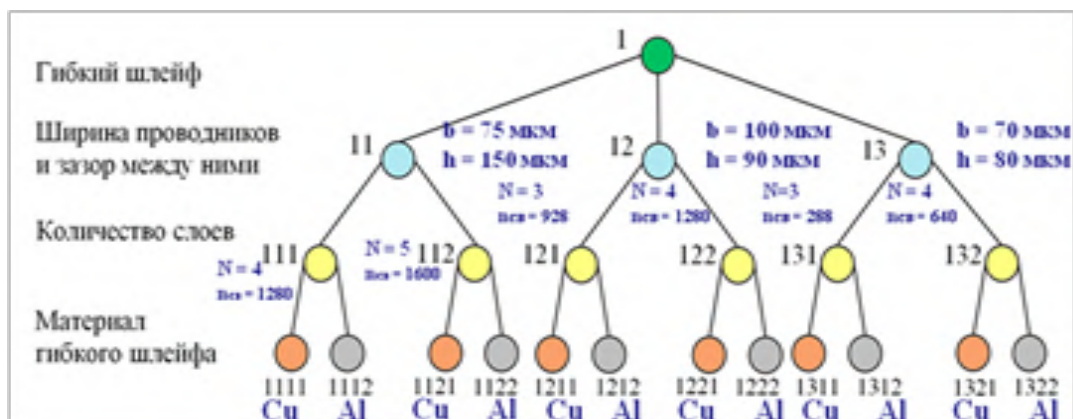


Рис. 2. Дерево решений

В дереве решений представлены следующие уровни иерархии:

- 1 – множество вариантов топологий гибкого шлейфа;
- 2 – ширина проводников и зазор между ними; в рассматриваемом случае представлен выбор между шириной  $b = 75$  мкм при зазоре  $h = 150$  мкм (11), шириной  $b = 100$  мкм при зазоре  $h = 90$  мкм (12) и шириной  $b = 70$  мкм при зазоре  $h = 80$  мкм (13);
- 3 – количество слоев гибкого шлейфа (4 и 5 для первых двух вариантов; 3 и 4 для третьего варианта);
- 4 – материал шлейфа (рассмотрены медная и алюминиевая фольга на полиамидной пленке для каждого из вариантов).

На основе экспертных оценок формируются данные о выходе годных изделий по дереву решений. Априорное (экспертное) распределение, обозначаемое через  $P'(\theta)$ , представляет собой решение ПР до выполнения эксперимента.

В табл. 1 представлено априорное суждение проектировщика о вероятностях получения результата  $y$ .

Такие высокие значения вероятностей обусловлены требованиями к технологическому процессу изготовления гибкого полиамидного шлейфа и связаны с большим количеством проводников и точек сварки в многослойной структуре шлейфа.

Таблица 1. Суждения проектировщика о вероятностях результата  $y$

$y$	$P(y)$
99,0	0
99,1	0
99,2	0,02
99,3	0,03
99,4	0,05
99,5	0,1
99,6	0,35
99,7	0,2
99,8	0,15
99,9	0,05
100	0,05

Далее проектировщик принимает решение об априорном распределении по  $\theta$  при условии  $y$  (табл. 2).

Таблица 2. Априорное распределение по  $\theta$  при условии  $y$

$y$	$\theta$											$P(y)$
	99,0	99,1	99,2	99,3	99,4	99,5	99,6	99,7	99,8	99,9	100	
99,2	0,05	0,15	0,5	0,25	0,05	-	-	-	-	-	-	0,02
99,3	-	0,05	0,15	0,40	0,20	0,15	0,05	-	-	-	-	0,03
99,4	-	-	0,05	0,25	0,30	0,30	0,10	-	-	-	-	0,05
99,5	-	-	-	-	0,20	0,25	0,40	0,15	-	-	-	0,1
99,6	-	-	-	-	-	0,05	0,40	0,40	0,15	-	-	0,35
99,7	-	-	-	-	-	0,05	0,50	0,30	0,15	-	-	0,2
99,8	-	-	-	-	-	-	0,05	0,05	0,70	0,10	0,10	0,15
99,9	-	-	-	-	-	-	0,05	0,25	0,35	0,25	0,10	0,05
100	-	-	-	-	-	-	0,05	0,10	0,60	0,20	0,05	0,05

По данным табл. 2 строим гистограмму априорного распределения (рис. 3).

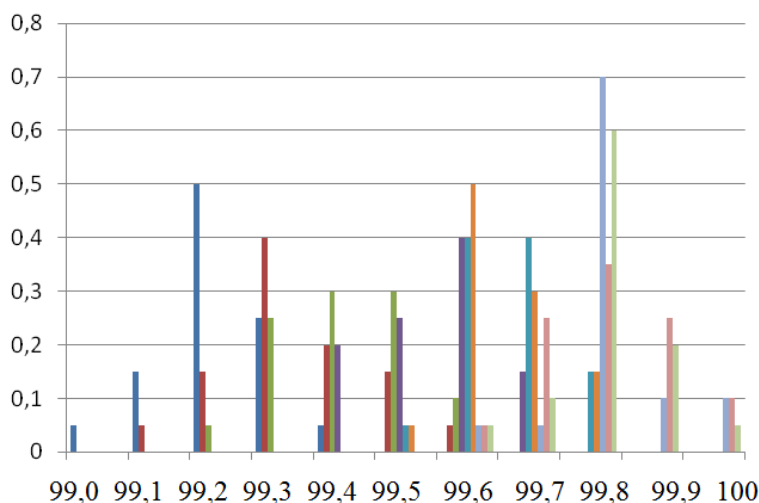


Рис. 3. Гистограмма априорного распределения

Определяется совместное распределение  $P(\theta, y)$  (табл. 3).

Таблица 3. Совместное распределение  $P(\theta, y)$

$y$		99,0	99,1	99,2	99,3	99,4	99,5	99,6	99,7	99,8	99,9	100	$P(y)$
99,2	$P(\theta/y)$	0,001	0,003	0,01	0,005	0,001	-	-	-	-	-	-	0,02
99,3		-	0,0015	0,0045	0,012	0,006	0,0045	0,0015	-	-	-	-	0,03
99,4		-	0,0025	0,0125	0,015	0,015	0,005	-	-	-	-	-	0,05
99,5		-	-	-	-	0,02	0,025	0,04	0,015	-	-	-	0,1
99,6		-	-	-	-	-	0,0175	0,14	0,14	0,0525	-	-	0,4
99,7		-	-	-	-	-	0,01	0,1	0,06	0,03	-	-	0,2
99,8		-	-	-	-	-	-	0,0075	0,0075	0,105	0,015	0,015	0,15
99,9		-	-	-	-	-	-	0,0025	0,0125	0,0175	0,0125	0,005	0,05
100		-	-	-	-	-	-	0,0025	0,005	0,03	0,01	0,0025	0,05
$P(\theta)$		0,001	0,007	0,027	0,032	0,042	0,062	0,294	0,24	0,235	0,0375	0,0225	



В последней строке табл. 3 приведены значения безусловного распределения  $P(\theta)$ . По данным таблицы вычисляем  $g_i(m) = \sum_{\theta} P(\theta, y = m + \theta)$ , значения вероятностей  $P(\theta, y = m + \theta)$  для различных  $\theta$  и  $m$  занесены в табл. 4.

Таблица 4. Значения вероятностей  $P(\theta, y = m + \theta)$

$m$	$P(m)$
-0,3	0,0015
-0,2	0,088
-0,1	0,246
0	0,382
0,1	0,195
0,2	0,075
0,3	0,01
0,4	0,0025

Далее необходимо рассмотреть экспериментальные значения вероятности выхода годных изделий для всех возможных вариантов по дереву решений.

Общее значение апостериорной вероятности будет складываться из значений вероятностей выхода годных проводников гибкого шлейфа в зависимости от их ширины, зазора между ними, материала фольги многослойной гибкой структуры, а также выхода годных точек сварки (в зависимости от количества точек). Стоит учитывать, что при УЗ-сварке меди может возникать сильное окисление поверхности проводников при повышении температуры в ходе технологического процесса, а также воздействие на полиамид (приводящее к деформации, короблению, расслоению). Поэтому надежность сварного соединения при использовании меди ниже, чем у алюминия.

Вероятности выхода годных проводников составляют: при ширине 75 мкм – 99,912 %; при ширине 100 мкм – 99,932 % и при 70 мкм – 99,910 %.

Вероятности выхода годных проводников, связанные с использованием разного материала металлизации полиамидного шлейфа (с учетом особенностей сварки, технологического процесса изготовления шлейфа, сборки, а также эксплуатационных характеристик МПУ): при использовании меди – 99,97 %; для алюминия – 99,98 %.

Вероятность брака одного сварного соединения при УЗ-сварке равна 0,0003 %. Отсюда вероятность выхода одного годного соединения составляет 99,9997 %.

В зависимости от выбранных при разработке топологии МПУ ширины проводников и зазора между ними, а также количества слоев гибкого полиамидного шлейфа в многослойной структуре прижимающей пластины МПУ может насчитываться от 288 до 1600 сварок.

Вероятности выхода годных сварных соединений определяются из выражения

$$P_{Ncc} = (P_{1cc})^n, \quad (3)$$

где  $n$  – количество сварок;  $P_{1cc}$  – вероятность выхода одного годного соединения, равная 99,9997 %.

Апостериорные значения выхода годных изделий занесены в табл. 5.

Таблица 5. Апостериорные значения выхода годных изделий

№	$y^*$
1111	99,4992
1112	99,5092
1121	99,4037
1122	99,4137
1211	99,7104
1212	99,7204
1221	99,5191
1222	99,5291
1311	99,7938
1312	99,8037
1321	99,6023
1322	99,6123

Далее по формуле Байеса необходимо перейти от априорного распределения к апостериорному

$$P''(\theta | y) = \frac{P'(\theta) \times P(y^* | \theta)}{\sum_{\theta} P(\theta) \times P(y^* | \theta)}. \quad (4)$$

Результаты расчетов апостериорных вероятностей занесены в табл. 6.

Таблица 6. Апостериорное распределение

$y$	99,1	99,2	99,3	99,4	99,5	99,6	99,7	99,8	99,9	100	$P(y)$
99,4	0,002	0,051	0,157	0,405	0,385	-	-	-	-	-	0,167
99,5	-	-	-	0,065	0,189	0,577	0,169	-	-	-	0,333
99,6	-	-	-	-	0,060	0,550	0,289	0,101	-	-	0,167
99,7	-	-	-	-	0,022	0,271	0,434	0,273	-	-	0,167
99,8	-	-	-	-	-	0,130	0,275	0,529	0,054	0,012	0,167

По данным табл. 6 построена гистограмма первого апостериорного распределения (рис. 4).

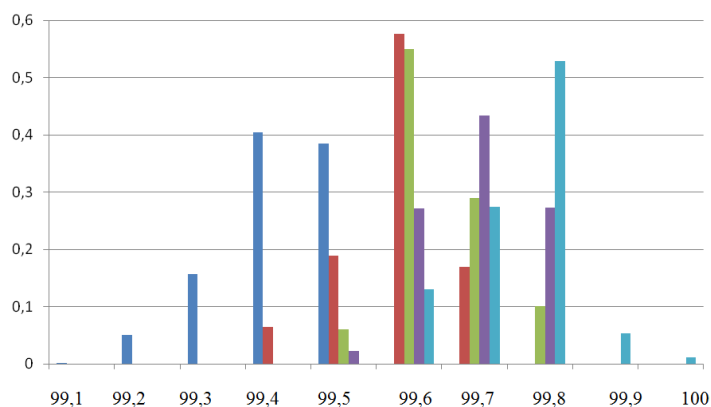


Рис. 4. Гистограмма первого апостериорного распределения



В табл. 7 приведено совместное распределение  $P(\theta, y)$ .

Таблица 7. Совместное распределение  $P(\theta, y)$

$y$		99,1	99,2	99,3	99,4	99,5	99,6	99,7	99,8	99,9	100	$P(y)$
99,4	$P(\theta/y)$	0,000333	0,0085	0,0262	0,0675	0,0642	-	-	-	-	-	0,167
99,5		-	-	-	0,02165	0,0629	0,19214	0,05628				0,333
99,6		-	-	-	-	0,01	0,0917	0,0482	0,01683	-	-	0,167
99,7		-	-	-	-	0,0037	0,0452	0,0723	0,0455	-	-	0,167
99,8		-	-	-	-	-	0,0217	0,0458	0,0882	0,009	0,002	0,167
	$P(\theta)$	0,000333	0,0085	0,026167	0,089145	0,140771	0,350642	0,22261	0,1505	0,009	0,002	

По данным табл. 7 вычисляется  $g_i(m) = \sum_{\theta} P(\theta, y = m + \theta)$ , значения вероятностей

$P(\theta, y = m + \theta)$  для различных  $\theta$  и  $m$  занесены в табл. 8.

Таблица 8. Значения вероятностей  $P(\theta, y = m + \theta)$

$m$	$P(m)$
-0,2	0,07511
-0,1	0,35904
0	0,38260
0,1	0,14885
0,2	0,03390
0,3	0,00033

Второе апостериорное распределение представлено в табл. 9.

Таблица 9. Второе апостериорное распределение

$y$	99,1	99,2	99,3	99,4	99,5	99,6	99,7	99,8	99,9	100	$P(y)$
99,4	0,000001	0,00324	0,04385	0,38395	0,56896	-	-	-	-	-	0,167
99,5	-	-	-	0,06327	0,25679	0,60024	0,0797	-	-	-	0,333
99,6	-	-	-	-	0,085	0,545	0,324	0,046	-	-	0,167
99,7	-	-	-	-	0,0243	0,2661	0,434	0,2755	-	-	0,167
99,8	-	-	-	-	-	0,112	0,313	0,543	0,031	0,001	0,167

По данным табл. 9 строим гистограмму для второго апостериорного распределения (рис. 5).

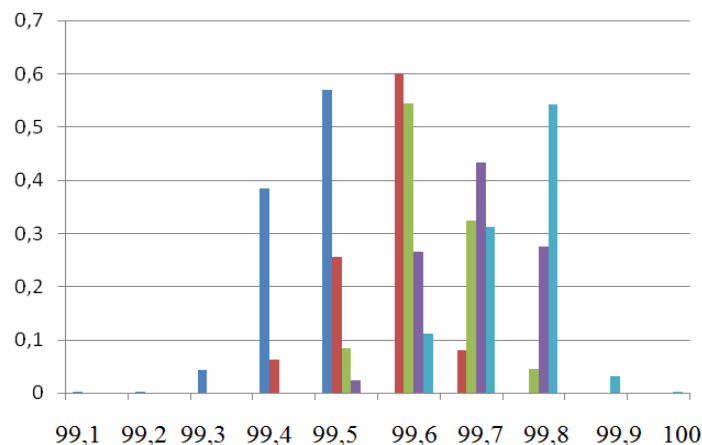


Рис. 5. Гистограмма второго апостериорного распределения

Второе совместное распределение  $P(\theta, y)$  представлено в табл. 10.

Таблица 10. Второе совместное распределение  $P(\theta, y)$

$y$		99,1	99,2	99,3	99,4	99,5	99,6	99,7	99,8	99,9	100	$P(y)$
99,4	$P(\theta/y)$	0,0000002	0,00054	0,051	0,064	0,095	-	-	-	-	-	0,167
99,5		-	-	-	0,021	0,088	0,2	0,027	-	-	-	0,333
99,6		-	-	-	-	0,0142	0,091	0,054	0,0087	-	-	0,167
99,7		-	-	-	-	0,004	0,044	0,072	0,046	-	-	0,167
99,8		-	-	-	-	-	0,019	0,052	0,091	0,005	0,00017	0,167
	$P(\theta)$	0,0000002	0,00054	0,0051	0,085	0,199	0,354	0,205	0,145	0,005	0,00017	

Необходимо определить значение стоимостного фактора («выгоды»), в нашем случае это количество выхода годных изделий.

Ожидаемая «выгода»  $u^*$  определяется по формуле  $u^*(e_{ij}) = P_{ij}(y) \cdot u(e_{ij}, y)$ .

Для определения выгоды от каждого варианта топологии гибкого шлейфа введена десятибалльная шкала оценок используемого материала шлейфа и количества его слоев (табл. 11).

Таблица 11. Определение выгоды оборудования

Вариант	Количество слоев	Количество сварок	$u$
1111	9,83	6,0	7,915
1112	9,85	6,0	7,925
1121	9,7875	5,0	7,39375
1122	9,8125	5,0	7,40625
1211	9,83	8,0	8,915
1212	9,85	8,0	8,925
1221	9,7875	6,0	7,89375
1222	9,8125	6,0	7,90625
1311	9,8725	9,1	9,48625
1312	9,8975	9,1	9,49875
1321	9,83	7,1	8,465
1322	9,85	7,1	8,475

Ожидаемая выгода  $u^*$  определяется по формуле  $u^*(e_{ij}) = P_{ij}(y) \cdot u(e_{ij}, y)$ .

Результаты расчетов занесены в табл. 12.

## Выводы

Таким образом, в статье предложена модель выбора топологии многослойного гибкого коммутационного шлейфа для телекоммуникационных устройств на основании байесовских статистических решений с целью снижения брака при его производстве.

В соответствии с проведенными расчетами, наилучшим вариантом топологии гибкого шлейфа по стоимостному критерию количества выхода годных изделий является вариант 1312 в соответствии с деревом решений, что соответствует трехслойному шлейфу с шириной проводников 70 мкм и зазором между ними 80 мкм (количество сварных соединений – 288) при использовании алюминиевой фольги.

Таблица 12. Ожидаемая выгода

Вариант	$P_{ij}(y)$	$u^*(e_{ij})$	Вариант	$P_{ij}(y)$	$u^*(e_{ij})$	Вариант	$P_{ij}(y)$	$u^*(e_{ij})$
1111 $y^* =$ = 99,50 %	0,021	0,166215	1112 $y^* =$ = 99,50 %	0,021	0,166425	1121 $y^* =$ = 99,40 %	0,0000002	0,0000015
	0,088	0,69652		0,088	0,6974		0,00054	0,00399
	0,200	1,583		0,200	1,585		0,051	0,3771
	0,027	0,213705		0,027	0,213975		0,064	0,4732
	-	-		-	-		0,095	0,7024
1122 $y^* =$ = 99,41%	0,0000002	0,00000148	1211 $y^* =$ = 99,71 %	0,004	0,03566	1212 $y^* =$ = 99,72 %	0,004	0,0357
	0,00054	0,0039994		0,044	0,39226		0,044	0,3927
	0,051	0,37771875		0,072	0,64188		0,072	0,6426
	0,064	0,474		0,046	0,41009		0,046	0,41055
	0,095	0,70359		-	-		-	-
1221 $y^* =$ = 99,52 %	0,021	0,16577	1222 $y^* =$ = 99,53 %	0,021	0,16603	1311 $y^* =$ = 99,79 %	0,019	0,18024
	0,088	0,69465		0,088	0,69575		0,052	0,493285
	0,200	1,57875		0,200	1,58125		0,091	0,863249
	0,027	0,21313		0,027	0,21347		0,005	0,0474
	-	-		-	-		0,00017	0,00161
1312 $y^* =$ = 99,80 %	0,019	0,1805	1321 $y^* =$ = 99,60 %	0,0142	0,120203	1322 $y^* =$ = 99,61 %	0,0142	0,12035
	0,052	0,493935		0,091	0,77032		0,091	0,77123
	0,091	0,86439		0,054	0,45711		0,054	0,45765
	0,005	0,04749		0,0087	0,0736		0,0087	0,0737
	0,00017	0,001615		-	-		-	-

Описанный подход позволяет значительно снизить трудоемкость проектирования гибких многослойных коммутационных структур, имеющих сложную топологию.

### Список литературы:

1. Олифер В.Г., Олифер Н.А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: Учебник для вузов. 3-е издание. – СПб.: Питер, 2006. – 958 с.
2. Технологии в производстве электроники. Часть III. Гибкие печатные платы / Под общ. ред. А. М. Медведева и Г. В. Мылова. – М.: Группа ИДТ, 2008. – 488 с.
3. Пирогова Е.В. Проектирование и технологии печатных плат. – М.: Форум: Инфра-М, 2005. – 560 с.
4. Мангейм М.Л. Иерархические структуры. Модель процессов проектирования и планирования. – М.: Мир, 1970. – 180 с.
5. Патент № 95190 України, МПК Н05К 3/40. Мікроелектромеханічний багатозондовий підмикальний пристрій / Невлюдов І. Ш., Жарікова І. В., Палагін В. А., Разумов-Фризюк Є. А. та ін. Опубл. 11.07.11. Бюл. № 13.