

ПРИМЕНЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

Е. А. Данилова¹, Н. С. Алмашкина², И. М. Рыбаков³

^{1,2,3} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
¹ siori@list.ru, ² nadezhda_poteshkina@mail.ru, ³ rybakov_im@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* В современной радиоэлектронной аппаратуре печатные платы являются основной составляющей и выполняют важную роль объединения всех электронных элементов для выполнения заданных функций устройства. Процесс производства печатных плат довольно сложен и включает несколько стадий, каждая из которых состоит из определенного набора работ. Возникновение технологических дефектов возможно на любой стадии и связано с условиями производства, используемым оборудованием, применяемыми материалами, квалификацией персонала и т.д. Поэтому особо важным становится учет и анализ всех возникающих дефектов для своевременного изменения и корректировки технологического процесса производства печатных плат в целях недопущения выпуска некачественной продукции. *Материалы и методы.* В статье рассмотрены такие методы обработки и анализа статистических данных по технологическим дефектам, как построение диаграммы Исикавы, диаграммы Парето, а также ABC-анализ. Применение данных методов позволило выявить основные виды дефектов печатных плат по данным предприятия-изготовителя. *Результаты.* Приведены результаты оценки качества печатных плат статистическими методами анализа. Предложена классификация технологических дефектов печатных плат и сформулированы возможные причины их возникновения. *Выводы.* Рекомендуемый порядок мониторинга технологических дефектов печатных плат позволит повысить качество выпускаемой продукции за счет выявления и устранения причин, приводящих к его максимальному снижению. Также приведены основные направления работы в области повышения качества, позволяющие устранить причины наиболее значимых дефектов печатных плат.

Ключевые слова: печатная плата, дефект, технологический процесс, контроль качества, математико-статистические методы, диаграмма Парето

Финансирование: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-20318, <https://rscf.ru/project/22-29-20318>

Для цитирования: Данилова Е. А., Алмашкина Н. С., Рыбаков И. М. Применение статистических методов оценки надежности печатных плат // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 4. С. 119–129. doi: 10.21685/2307-4205-2023-4-11

APPLICATION OF STATISTICAL METHODS EVALUATION OF THE RELIABILITY OF PRINTED CIRCUIT BOARDS

E.A. Danilova¹, N.S. Almashkina², I.M. Rybakov³

^{1,2,3} Penza State University, Penza, Russia
¹ siori@list.ru, ² nadezhda_poteshkina@mail.ru, ³ rybakov_im@mail.ru

Abstract. *Background.* In modern electronic equipment, printed circuit boards are the main component and play an important role in combining all electronic elements to perform the specified functions of the device. The process of producing printed circuit boards is quite complex and includes several stages, each of which consists of a specific set of works. The occurrence of technological defects is possible at any stage and is associated with production conditions, equipment, materials, qualification of staff, etc. Therefore, taking into account and analyzing all emerging defects for timely changes and adjustments to the technological process of printed circuit board production in order to prevent the release of low-quality products become especially important. *Materials and methods.* The article discusses such methods of processing and analyzing statistical data on technological defects as constructing Ishikawa's diagrams, Pareto's diagrams, and ABC analysis. The application of these methods made it possible to identify the main types of defects in printed circuit boards according to the manufacturer's data. *Results.* The results of evaluating the quality of printed circuit boards using statistical methods of analysis are presented. A classification

of technological defects in printed circuit boards is proposed and possible causes of their occurrence are formulated. *Conclusions.* The recommended procedure for monitoring technological defects of printed circuit boards will improve the quality of products by identifying and minimizing the causes leading to its maximum reduction. The main directions of work in the field of quality improvement are also given, allowing to eliminate the causes of the most significant defects of printed circuit boards.

Keywords: printed circuit board, defect, technological process, quality control, mathematical and statistical methods, Pareto diagram

Financing: the research has been realized at the expense of the grant of the Russian Science Foundation the project № 22-29-20318, <https://rscf.ru/en/project/22-29-20318>

For citation: Danilova E.A., Almashkina N.S., Rybakov I.M. Application of statistical methods evaluation of the reliability of printed circuit boards. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2023;(4):119–129. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2023-4-11

Введение

Одной из основных функций управления качеством является контроль. Его значение заключается в возможности выявления несоответствий с последующим оперативным их исправлением с минимальными потерями для производства.

Контроль качества осуществляется путем сравнения запланированных показателей качества с их действительными значениями, т.е. необходимо проверить показатели качества, сравнить их и найти отклонение от запланированных значений. В случае обнаружения отклонений необходимо установить причину их появления, провести корректировку показателей качества и повторно проверить соответствие скорректированных показателей качества их запланированным значениям.

Требования к качеству устанавливаются и фиксируются в нормативных (НД) и нормативно-технических документах (НТД).

Отклонение качества продукции от заданных параметров происходит, как правило, в сторону ухудшения и имеет как общие, так и частные проявления. К числу общих относятся моральный износ, физическое и моральное старение продукции, т.е. потеря первоначальных свойств при эксплуатации. Частные отклонения качества от установленных требований чрезвычайно разнообразны и обусловлены уже не экономической и технологической природой, а условиями внешнего характера: нарушение правил эксплуатации; ошибки разработчиков и/или изготовителей; нарушения производственной дисциплины; дефекты оборудования.

Таким образом, можно сделать вывод, что качество продукции находится в постоянном движении и представляет собой неустойчивый объект, требующий контроля. Научной основой современного технического контроля является математико-статистические методы [1].

Классификация технологических дефектов ПП

На всех современных предприятиях ведется статистика изготовления печатных плат (ПП). Также регистрируется количество бракованных изделий и происходит анализ возможных причин возникновения брака. Анализируя опыт работы предприятий, выпускающих ПП, по данным из открытых источников, можно выделить наиболее часто встречающиеся виды технологических дефектов и сформулировать возможные причины их возникновения (табл. 1) [2–4].

Таблица 1

Дефекты ПП и их возможные причины

Дефект	Причина
1	2
Непропрессовка	Изначально выбран некачественный материал Неправильное хранение материалов Использовалась склеивающая прокладка с истекшим сроком годности Использовалась склеивающая прокладка с низким содержанием смолы Некачественная подготовка слоев перед прессованием Нарушение режимов прессования Недостаточно отработанный процесс прессования Запыленность производственных помещений

1	2
Погрешности фотошаблона	Несоответствие рисунка схемы на фотошаблоне проектному заданию Несоответствие геометрических размеров элементов рисунка на фотошаблоне Изначально выбран некачественный материал Неправильное хранение материалов Неправильное хранение готовых фотошаблонов (температура и влажность нестабильны, присутствуют высокие перепады) Неправильно выбраны режимы обработки фотопленки Отсутствует/нарушена вакуумная гигиена (чистые помещения) На поверхностях стоек и полок, предназначенных для работы с фотопленкой, присутствуют заусенцы и/или неровности, которые могут поцарапать эмульсию фотопленки Запыленность производственных помещений
Смещение слоев	Неоднородность склеивающего материала Изначально выбран некачественный материал Нарушение режимов прессования Недостаточно отработанный процесс прессования Неправильное хранение материалов Погрешность базирования при сборке пакета для прессования Недостаточное число фиксирующих штырей Сдвиг слоя в момент перехода от нулевого к полному давлению
Замыкание электрических цепей	Некачественное травление Смещение слоев при прессовании Деформация диэлектрических оснований Неправильное базирование ПП при выполнении отверстий Низкое качество стеклотекстолита Малое расстояние между элементами печатного монтажа Запыленность производственных помещений
Погрешность сверления	Затупленное сверло Искажение геометрии сверла Изначально выбран некачественный материал Погрешности фотошаблона Не отработана технология сверления При сверлении используется более одной МПП в стопе Неправильно выбраны режимы обработки
Дефекты лужения	Изначально выбран некачественный материал Неправильное хранение материалов Не отрегулированы воздушные ножи в установке (угол положения и зазор) Недостаточно отработанный процесс горячего лужения Плохое качество припоя Нарушение технологических режимов
Дефекты металлизации	Нарушена концентрация растворов в ваннах Недостаточно отработанный процесс Некачественное сверление (при дефектах металлизации в отверстиях) Запыленность производственных помещений Нарушение технологических режимов Изначально выбран некачественный материал

Сбор данных о видах и количестве технологических дефектов позволит своевременно организовать корректировку технологических процессов и условий производства с целью недопущения выпуска изделий низкого качества [5].

Обработка и анализ статистических данных на примере диаграммы Исикавы

В каждом производственном процессе на протяжении всего цикла могут возникать определенные препятствия и проблемы, истинную причину появления которых установить удастся не всегда. Для определения основных причин возникновения проблем (препятствий, трудностей) удобно прибегнуть к использованию диаграммы Исикавы (диаграмма «рыбьей кости», причинно-следственная диаграмма, диаграмма анализа корневых причин).

Диаграмма Исикавы – это графическое представление причин и результатов, по которому можно выявить, исследовать, определять и анализировать основные и вспомогательные причины возникновения нежелательных факторов и условий, вызывающих отклонения качества продукции [6, 7].

На рис. 1 показана диаграмма Исикавы, которая используется для анализа качества ПП на предприятии. При составлении диаграммы важно выявить максимальное число факторов, оказывающих влияние и даже просто имеющих отношение к возможному браку ПП. Эффективным и простым в реализации методом сбора данных является групповой метод, или мозговой штурм.

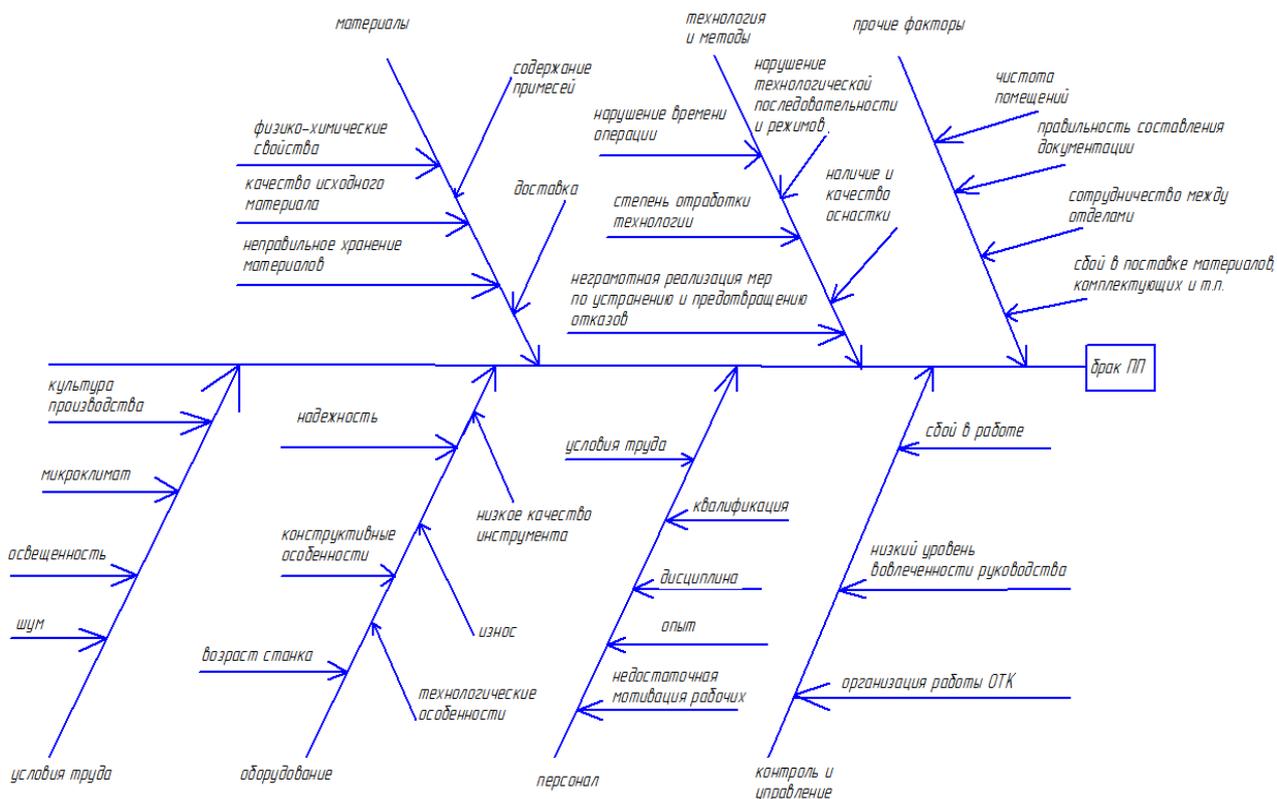


Рис. 1. Диаграмма Исикавы

При построении диаграммы Исикавы необходимо задать вопрос «Почему?» к возникшей проблеме, тогда можно выявить причины первого порядка. Затем задать вопрос «Почему?» к каждой причине первого порядка, тогда можно выявить причины второго порядка.

При проведении мозгового штурма выявляются различные причины, влияющие на брак изделий.

К причинам первого порядка были отнесены материалы, оборудование, технология и методы, условия труда, персонал, контроль, управление и прочие факторы.

На причины первого порядка непосредственное влияние оказывают причины второго порядка, а именно: физико-химические свойства материалов, содержание примесей, исходное качество материалов, неправильное хранение материалов, доставка материалов; нарушение времени операции, степень отработки технологии, неграмотная реализация мер по устранению и предотвращению отказов, нарушение технологической последовательности и режимов, наличие и качество оснастки; чистота помещений, правильность составления документации, сотрудничество между отделами, сбой в поставке материалов и комплектующих; культура производства, микроклимат, освещенность, шум; надёжность оборудования и его конструктивные особенности, возраст станка, низкое качество инструмента, износ, технологические особенности; условия труда, квалификация персонала, дисциплина, опыт персонала, недостаточная мотивация рабочих; низкий уровень вовлеченности руководства, сбой в работе, организация работы ОТК.

Зачастую предприятия оснащены различным дорогостоящим высокоточным оборудованием, однако количество единиц оборудования – не гарантия бездефектного производства. Важно, чтобы

оборудование было работоспособным именно на конкретном предприятии, чтобы использовалось в полной мере и не простаивало. Немаловажно уделить внимание и применяемой оснастке, средствам контроля и измерений, как ответственно и своевременно проходит их поверка и ее сроки; а также условиям труда, мотивации сотрудников, чистоте помещений. Если в производственных помещениях нарушен микроклимат (отсутствие кондиционеров в летнее время или некачественное отопление помещений в зимний период), шум, плохая освещенность и прочее, то работники будут испытывать большую утомляемость, что впоследствии может стать причиной невнимательности и привести к появлению дефектов. Важной составляющей при изготовлении качественной продукции является чистота производственных помещений и соблюдение требований к средствам индивидуальной защиты (СИЗ). Запыленность цехов, неудовлетворительное межоперационное хранение деталей, некорректное использование технологической одежды: халат, перчатки, шапочка, бахилы (особенно в чистых помещениях) или ее отсутствие, является причиной возникновения дефектов изделий на разных стадиях технологического процесса.

Особо следует выделить группу «прочие факторы», которая необходима для регистрации факторов, не связанных с причинами первого порядка, но важных для анализа процесса в целом.

Обработка и анализ статистических данных на примере диаграммы Парето

Анализ проводился на основе годовых данных выпуска ПП на предприятии. В табл. 2 и на рис. 2 представлены данные о распределении заказов по видам ПП за год для отлаженного производства. Предприятие выпускает все виды ПП, а именно односторонние (ОПП), двусторонние (ДПП), многослойные (МПП) и гибкие ПП (ГПП).

Таблица 2

Распределение заказов по видам ПП за год

Обозначение печатных плат	Количество печатных плат в год, шт.	Доля печатных плат от общего количества, %
ОПП	120	2,6
ДПП	1340	29,8
МПП	2780	61,8
ГПП	260	5,8
Итого	4500	100

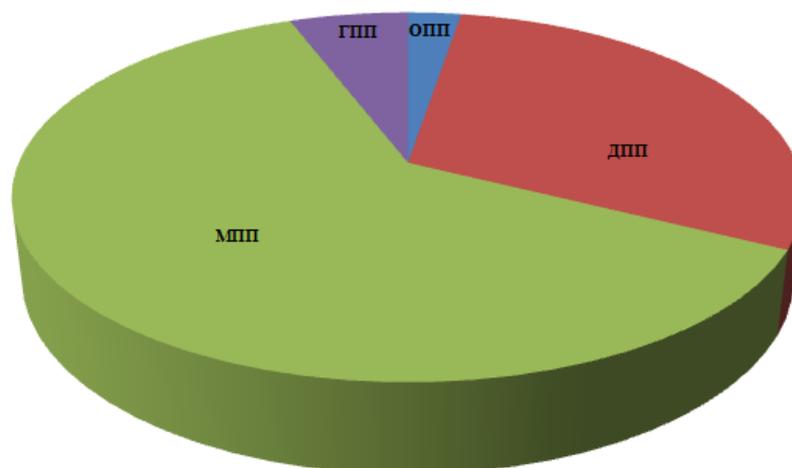


Рис. 2. Распределение заказов по видам ПП за год

На разных стадиях технологического процесса изготовления ПП могут возникать различного рода технологические дефекты [8, 9]. При обнаружении дефектов данные фиксируются и проводится отнесение дефекта к одному из видов (классификация) (табл. 3). Затем строятся специальные диаграммы (рис. 3), позволяющие выявить наиболее повторяющиеся дефекты, установить периодичность их появления и более детально провести анализ причин возникновения [10].

Таблица 3

Распределение дефектов ПП за прошедший период по кварталам

Вид дефектов	1 квартал	2 квартал	3 квартал	4 квартал	Общее за год
Непропрессовка	22	15	11	21	69
Погрешности фотошаблона	19	13	19	14	65
Замыкание электрических цепей	11	14	17	15	57
Дефекты металлизации	8	14	10	7	39
Погрешность сверления	4	8	6	9	27
Смещение слоев	6	4	2	5	17
Дефекты лужения	1	3	1	2	7
Коробление ПП	3	2	1	0	6
Итого	74	73	67	73	287

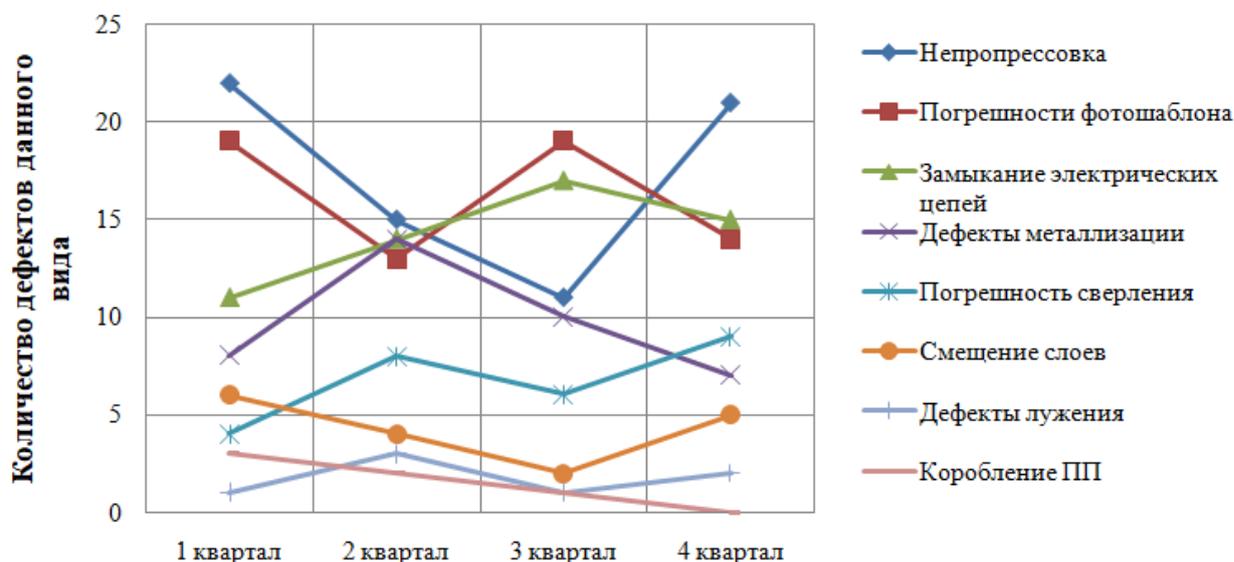


Рис. 3. Распределение дефектов по кварталам

По результатам анализа диаграмм выявлено, что основными видами дефектов ПП за прошедший период являются: непропрессовка, погрешности фотошаблона, смещение слоев, замыкание электрических цепей, погрешность сверления, дефекты лужения, дефекты металлизации, коробление ПП. Причем наличие сильных причинно-следственных связей между обнаруженными дефектами не установлено (значение коэффициента корреляции не превышает 0,27, что говорит об умеренной связи между данными).

Построение диаграммы Парето осуществляется на основе данных табл. 4.

Таблица 4

Исходные данные для построения диаграммы Парето

Вид дефектов	Число дефектов	Накопленная сумма дефектов	Дефекты в общей сумме, %	Накопленный процент дефектов, %	Группа
Непропрессовка	69	69	24,04	24,04	A
Погрешности фотошаблона	65	134	22,65	46,69	
Замыкание электрических цепей	57	191	19,86	66,55	
Дефекты металлизации	39	230	13,59	80,14	B
Погрешность сверления	27	257	9,4	89,54	
Смещение слоев	17	274	5,92	95,46	C
Дефекты лужения	7	281	2,44	97,9	
Коробление ПП	6	287	2,1	100	
Итого	287	-	100	-	-

В первой графе приведены наименования видов дефектов, упорядоченные по убыванию числа их появлений. Во второй графе приведено количество дефектов данного вида за год. Третья графа «Накопленная сумма дефектов» получается путем суммирования количества выявленных дефектов соответствующего вида с накопленной суммой предыдущей строки. Накопленную сумму дефектов рассчитывают со второй строки, последовательно наращивая последующие строки значением предыдущей строки. Аналогично выполнить расчеты по остальным видам дефектов. В четвертой графе рассчитывается процент дефектов данного вида от общей суммы дефектов. Данные в пятой графе представляют собой кумулятивную долю дефектов, на основании которой и строится кривая Лоренса.

Диаграмма Парето – инструмент визуализации данных, с помощью которого проводится анализ дефектов, и определяются наиболее значимые причины, приводящие к возникновению данных дефектов [11]. Методика построения диаграммы реализует принцип 20/80. В приложении к анализу дефектов ПП он может быть сформулирован следующим образом: 80 % дефектов обусловлены 20 % причин. Таким образом, установление основных причин возникновения дефектов и принятые меры к их устранению позволят значительно повысить качество выпускаемых ПП.

Построение диаграммы Парето (рис. 4) осуществляется в два этапа. Сначала строится столбчатая диаграмма, высота столбцов которой соответствует числу дефектов данного вида (графа 2 табл. 4). Далее на диаграмме проводится кумулятивная кривая, отражающая накопленный процент дефектов (графа 5 табл. 4).

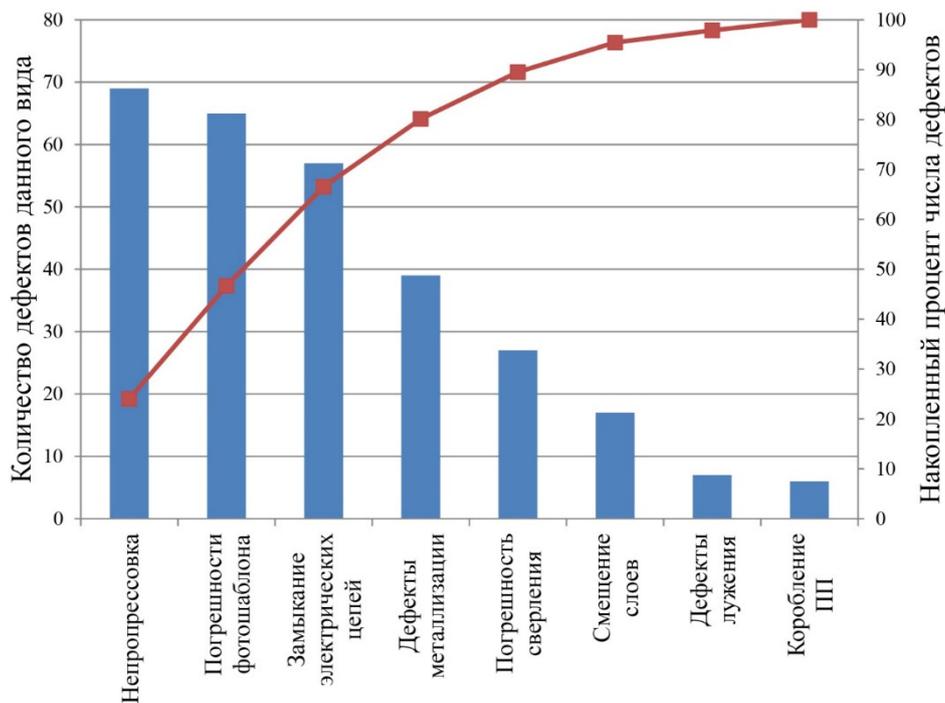


Рис. 4. Диаграмма Парето

После построения диаграммы Парето для выявления дефектов необходимо определиться и с причинами их возникновения. Одним из наиболее распространенных методов разделения факторов на степени влияния является *ABC*-анализ. Метод заключается в разбиении всей совокупности дефектов на три группы в порядке убывания суммы потерь и их значимости для достижения качества продукции [12].

Пользуясь классической пропорцией разбиения «80/15/5», распределим дефекты по частоте их появления (количеству дефектов данного вида) на группы:

- группа *A* – наиболее важные существенные проблемы, на которые в сумме приходится 80,14 % (непропрессовка, погрешности фотошаблона, замыкание электрических цепей, дефекты металлизации);
- группа *B* – причины, которые в сумме имеют 15,32 % (погрешность сверления, смещение слоев);
- группа *C* – причины, на которые приходится 4,54 % (дефекты лужения, коробление ПП).

Таким образом, выявление и устранение причин группы *A* имеет больший приоритет, а связанные с ними мероприятия самую высокую эффективность. Реализация данных мероприятий приведет к снижению выпуска некачественных ПП более чем на 80 %, т.е. к максимальному снижению брака.

На основании табл. 1 можно выделить общие причины возникновения дефектов ПП: запыленность производственных помещений; выбор изначально некачественного материала, неправильное хранение материалов, нарушение технологических режимов обработки, а также несоблюдение правил межоперационного хранения заготовок, неиспользование средств индивидуальной защиты (перчатки, шапочка), нарушение микроклимата производственных помещений (температура, влажность).

Анализ дефектов группы *A* показал, что общими причинами, приводящими к их возникновению, являются нарушения технологических режимов изготовления печатных плат, запыленность производственных помещений, а также качество исходных материалов (табл. 5).

Таблица 5

Распределение дефектов группы *A* по причинам

Дефект	Нарушение технологических режимов	Запыленность производственных помещений	Исходные материалы
Непропрессовка	9	10	7
Погрешности фотошаблона	5	15	3
Замыкание электрических цепей	7	4	1
Дефекты металлизации	3	3	6
Итого	24	32	17

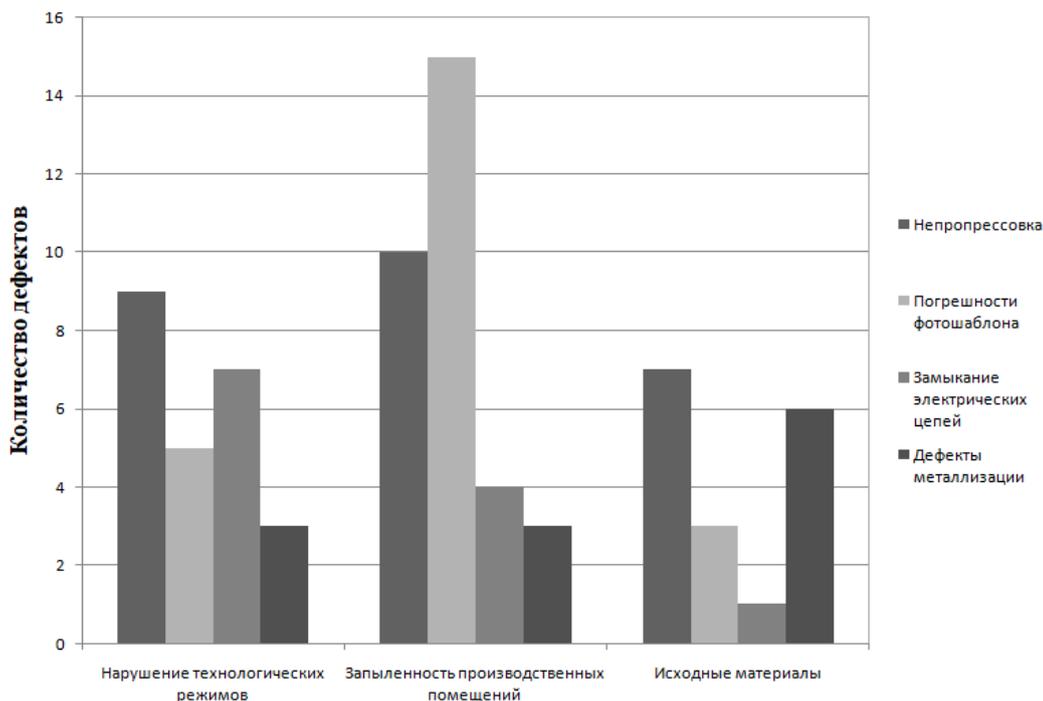


Рис. 5. Распределение дефектов группы *A* по причинам

Анализ диаграммы на рис. 5 показал, что причиной большинства дефектов является запыленность производственных помещений. Таким образом, можно сделать вывод, что создание чистых производственных помещений и соблюдение вакуумной гигиены на предприятии приведет к значительному снижению дефектов группы *A*.

Работа предприятия в области повышения качества должна заключаться:

- в создании и поддержании чистых производственных помещений;
- в более тщательном подборе исходных материалов и проведении их входного контроля. Оптимальным будет решение о закупке малых партий материалов, в целях отработки технологических режимов и принятия решений о дальнейшем их использовании;

- в соблюдении технологических режимов на всех стадиях технологического процесса;
- в соблюдении межоперационного хранения изделий.

Методика мониторинга дефектов ПП

На основе проведенного исследования технологических процессов производства ПП и дефектов, возникающих на различных стадиях, а также изучения современных статистических методов анализа дефектов на предприятии должна быть реализована методика мониторинга дефектов ПП, которая включает следующие этапы:

1 этап. Сбор первичной информации для анализа дефектов и формирование статистической базы данных.

Данные о наличии дефектов проводятся на основании маршрутных карт (точный список мероприятий и данных, касающихся перемещений ПП на производстве), куда оператор вносит информацию о возникновении каких-либо дефектов на каждой стадии технологического процесса; на основании бланков ОТК и на основании бланков входного контроля.

2 этап. Первичная обработка данных.

На данном этапе определяется перечень необходимых для использования методов статистического анализа (диаграмма Исикавы, диаграмма Парето и др.) и проводится обработка первичной информации.

3 этап. Выбор путей (мер, мероприятий) снижения количества дефектов ПП.

В ходе анализа устанавливаются те причины, которые приводят к максимальному в общем объеме количеству дефектов. Для этих целей также может использоваться ранее разработанная информационная модель «дефект – причина» (см. табл. 1) [8].

Внедрение данной методики повысит качество выпускаемой продукции за счет значительного снижения выпуска бракованных изделий.

Заключение

Таким образом, были рассмотрены виды дефектов ПП на различных стадиях производства, выявлены причины возникновения дефектов, разработана информационная модель «дефект – причина», проведены исследования и анализ статистических характеристик дефектов ПП, а также предложена методика мониторинга дефектов ПП на предприятии.

Проведенное исследование позволило сформулировать основные направления повышения качества выпускаемой продукции для конкретного производства.

Список литературы

1. Ефимов В. В., Барт Т. В. Статистические методы в управлении качеством продукции. М. : КноРус, 2020. 234 с.
2. Кочегаров И. И., Данилова Е. А., Юрков Н. К. [и др.] Анализ и моделирование развития латентных дефектов печатных проводников // Актуальные проблемы электронного приборостроения : тр. XIII Междунар. науч.-техн. конф. : в 12 т. (г. Новосибирск, 3–6 октября 2016 г.). Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2016. Т. 7. С. 126–131. EDN: YKTTAL
3. Ковалев В. Г., Мешков С. А., Ковалев А. А. Дефекты элементов топологии в производстве печатных плат. М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007.
4. Kochegarov I. I., Tankov G. V., Danilova E. Dynamic characteristics of printed circuit assembly under the influence of temperature // Proceedings of the 19th International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2016 (Saint Petersburg, 25–27 May 2016). Saint Petersburg : Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2016. P. 131–134. doi: 10.1109/SCM.2016.7519706 EDN: XFTJTG
5. Григорьев А. В., Данилова Е. А., Држевецкий А. Л. Классификация дефектов бортовой РЭА // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2013. Т. 1. С. 328–331. EDN: RXEXCF
6. Исикава К. Японские методы управления качеством. М. : Экономика, 1988. 215 с.
7. Назаров, М. А., Петухова Н. А. Диаграмма Исикавы анализа причин несоответствия продукции // Дневник науки. 2019. № 1. С. 44. EDN: YWAKAP
8. Данилова Е. А., Кочегаров И. И., Трусов В. А. Модели технологических дефектов проводящего рисунка печатных плат // Надежность и качество сложных систем. 2017. № 2. С. 68–76. doi: 10.21685/2307-4205-2017-2-12 EDN: YPTJLV

9. Шнейдмиллер В. Р. Дефекты и анализ печатных плат // Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций : материалы Всерос. науч.-техн. конф. (г. Самара, 15–17 мая 2018 г.) / под ред. А. И. Данилина. Самара : Офорт, 2018. С. 176–177. EDN: XPEAQP
10. Юрков Н. К., Кочегаров И. И., Данилова Е. А. Алгоритм моделирования процессов развития латентных технологических дефектов печатных плат // XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014 (г. Москва, 16–19 июля 2014 г.). М. : Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, 2014. С. 7092–7097. EDN: SSJDNN
11. Салахов Ф. Н. Диаграмма Парето и ABC-анализ – эффективный инструмент управления качеством продукции // Вестник Курганского государственного университета. Сер.: Технические науки. 2008. № 13. С. 78–81. EDN: NTPZWP
12. Козловский В. Н., Малеев Р. А. ABC анализ в обосновании выбора главных элементов надежности электрооборудования автомобилей // Грузовик. 2009. № 6. С. 31–33. EDN: OKGTTV
13. Данилова Е. А. Построение информационно-измерительной системы обнаружения дефектов проводящего рисунка печатных плат // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2016. № 4. С. 76–84. EDN: YGUKKT

References

1. Efimov V.V., Bart T.V. *Statisticheskie metody v upravlenii kachestvom produktssii = Statistical methods in product quality management*. Moscow: KnoRus, 2020:234. (In Russ.)
2. Kochegarov I.I., Danilova E.A., Yurkov N.K. et al. Analysis and modeling of the development of latent defects of printed conductors. *Aktual'nye problemy elektronnoy priborostroeniya: tr. XIII Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.: v 12 t. (g. Novosibirsk, 3–6 oktyabrya 2016 g.) = Actual problems of electronic instrumentation : tr. XIII International scientific and technical conference : in 12 volumes (Novosibirsk, October 3-6, 2016)*. Novosibirsk: Novosibirskiy gosudarstvennyy tekhnicheskyy universitet, 2016;7:126–131. (In Russ.). EDN: YKTTAL
3. Kovalev V.G., Meshkov S.A., Kovalev A.A. *Defekty elementov topologii v proizvodstve pechatnykh plat = Defects of topology elements in the production of printed circuit boards*. Moscow: MGTU im. N.E. Bauman, 2007. (In Russ.)
4. Kochegarov I.I., Tankov G.V., Danilova E. Dynamic characteristics of printed circuit assembly under the influence of temperature. *Proceedings of the 19th International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2016 (Saint Petersburg, 25–27 May 2016)*. Saint Petersburg: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2016:131–134. doi: 10.1109/SCM.2016.7519706 EDN: XFTJTT
5. Grigor'ev A.V., Danilova E.A., Drzhevetskiy A.L. Classification of on-board REA defects. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2013;1:328–331. (In Russ.). EDN: RXEXCF
6. Isikava K. *Yaponskie metody upravleniya kachestvom = Japanese methods of quality management*. Moscow: Ekonomika, 1988:215. (In Russ.)
7. Nazarov, M.A., Petukhova N.A. Ishikawa diagram of the analysis of the causes of nonconformity of products. *Dnevnik nauki = The diary of Science*. 2019;(1):44. (In Russ.). EDN: YWAKAP
8. Danilova E.A., Kochegarov I.I., Trusov V.A. Models of technological defects in the conductive pattern of printed circuit boards. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2017;(2):68–76. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2017-2-12 EDN: YPTJLV
9. Shneydmiller V.R. Defects and analysis of printed circuit boards. *Aktual'nye problemy radioelektroniki i telekommunikatsiy: materialy Vseros. nauch.-tekhn. konf. (g. Samara, 15–17 maya 2018 g.) = Actual problems of radioelectronics and telecommunications : materials of the All-Russian scientific and technical conf. (Samara, May 15–17, 2018)*. Samara: Ofort, 2018:176–177. (In Russ.). EDN: XPEAQP
10. Yurkov N.K., Kochegarov I.I., Danilova E.A. Algorithm for modeling the development of latent technological defects of printed circuit boards. *XII Vserossiyskoe soveshchanie po problemam upravleniya VSPU-2014 (g. Moskva, 16–19 iyulya 2014 g.) = XII All-Russian Meeting on management problems of VSPU-2014 (Moscow, July 16–19, 2014)*. Moscow: Institut problem upravleniya im. V.A. Trapeznikova RAN, 2014:7092–7097. (In Russ.). EDN: SSJDNN
11. Salakhov F.N. Pareto diagram and ABC analysis - an effective tool for product quality management. *Vestnik Kurganskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser.: Tekhnicheskies nauki = Bulletin of Kurgan State University. Ser.: Technical Sciences*. 2008;(13):78–81. (In Russ.). EDN: NTPZWP
12. Kozlovskiy V.N., Maleev R.A. ABC analysis in substantiation of the choice of the main elements of reliability of electrical equipment of cars. *Gruzovik = Truck*. 2009;(6):31–33. (In Russ.). EDN: OKGTTV
13. Danilova E.A. Construction of an information and measurement system for detecting defects in the conductive pattern of printed circuit boards. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2016;(4):76–84. (In Russ.). EDN: YGUKKT

Информация об авторах / Information about the authors

Евгения Анатольевна Данилова

кандидат технических наук, доцент кафедры
конструирования и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: siori@list.ru

Надежда Сергеевна Алмашкина

магистрант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: nadezhda_poteshkina@mail.ru

Илья Михайлович Рыбаков

кандидат технических наук, доцент кафедры
конструирования и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: rybakov_im@mail.ru

Evgeniya A. Danilova

Candidate of technical sciences,
associate professor of the sub-department
of radio equipment design and production,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Nadezda S. Almashkina

Master degree student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Илья М. Рыбаков

Candidate of technical sciences,
associate professor of the sub-department
of radio equipment design and production,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию / Received 22.08.2023

Поступила после рецензирования / Revised 11.09.2023

Принята к публикации / Accepted 30.09.2023