

УДК 681.2-5

doi: 10.21685/2072-3059-2025-2-7

Прогнозирование уровня дефектов производства печатных плат на базе их расчетной надежности

А. А. Трошин¹, И. В. Балахонова²

¹АО «ПО «Электроприбор», Пенза, Россия

²Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹mail@electropribor-penza.ru, ²i.v.balachonova@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Повышение надежности печатных плат связано со снижением уровня их дефектов в процессе производства. Задача прогнозирования уровня дефектов особенно актуальна в ситуации, когда предприятие входит в так называемую точку перегиба, где существующий технологический уровень дает сбой в обеспечении приемлемых показателей дефектов для нарастающего объема производства продукции новой сложности (например, при смене специализации контрактного производства печатных плат с 5 класса точности на 6 класс точности и выше). Заблаговременное определение уровня будущих дефектов позволяет разрабатывать и внедрять мероприятия по снижению издержек производства. *Цель исследования* – разработать систему уравнений для прогнозирования дефектов производства печатных плат. *Материалы и методы.* Для решения поставленной задачи используются метод математического моделирования и методы теории надежности. *Результаты.* Разработана система уравнений для расчета уровня дефектов производства печатных плат, а также спрогнозировано критичное значение данного производства многослойной печатной платы. *Выводы.* Проведена апробация формулы расчета. Результаты апробации демонстрируются на примере сложной многослойной печатной платы класса точности 5+ и многослойной печатной платы 5-го класса точности. Сделан вывод о возможности проведения расширенной апробации на предприятии – изготовителе печатных плат.

Ключевые слова: печатная плата, надежность производства печатной платы, технологический уровень производства, прогнозирование уровня дефектов печатных плат

Для цитирования: Трошин А. А., Балахонова И. В. Прогнозирование уровня дефектов производства печатных плат на базе их расчетной надежности // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2025. № 2. С. 77–88. doi: 10.21685/2072-3059-2025-2-7

Predicting the level of nonconformities (defects) in printed circuit board production based on their calculated reliability

A.A. Troshin¹, I.V. Balakhonova²

¹JSC “PO “Elektropribor”, Penza, Russia

²Penza State University, Penza, Russia

¹mail@electropribor-penza.ru, ²i.v.balachonova@mail.ru

Abstract. *Background.* Improving the reliability of printed circuit boards is associated with reducing the level of their defects in the production process. The task of forecasting the level of defects is especially relevant in a situation where an enterprise enters the so-called inflection point, where the existing technological level fails to ensure acceptable indicators

of defects for the increasing volume of production of products of new complexity (for example, when changing the specialization of contract production of printed circuit boards from accuracy class 5 to accuracy class 6 and higher). Early determination of the level of future defects allows developing and implementing measures to reduce production costs. The purpose of the study is to develop a formula for forecasting defects in the production of printed circuit boards. *Materials and methods.* The following are used to solve the problem: the method of mathematical modeling, methods of reliability theory. *Results.* A formula for calculating the level of defects in the production of printed circuit boards has been developed, and the critical value of this level has been predicted for the "point" implementation of an enhanced quality control procedure within a specific printed circuit board. *Conclusions.* The calculation formula has been tested. The results of the test are demonstrated using a specific multilayer printed circuit board as an example. It is planned to conduct an extended test at a printed circuit board manufacturer.

Keywords: printed circuit board, reliability of printed circuit board production, technological level of production, forecasting the level of defects of printed circuit boards

For citation: Troshin A.A., Balakhonova I.V. Predicting the level of nonconformities (defects) in printed circuit board production based on their calculated reliability. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2025;(2):77–88. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2025-2-7

Введение

Технологической основой развития электроники является закон Мура [1], согласно которому удвоение количества транзисторов на интегральной схеме каждые два года приводит к удешевлению микросхем. Отклонение от тенденции снижения цен на электронику по закону Мура происходит из-за увеличения стоимости производства [2]. В отношении печатных плат данное отклонение от закона Мура авторы данной статьи формулируют следующим образом: стоимость производства печатных плат экспоненциально возрастает с их усложнением при прохождении так называемой «точки перегиба» (рис. 1).

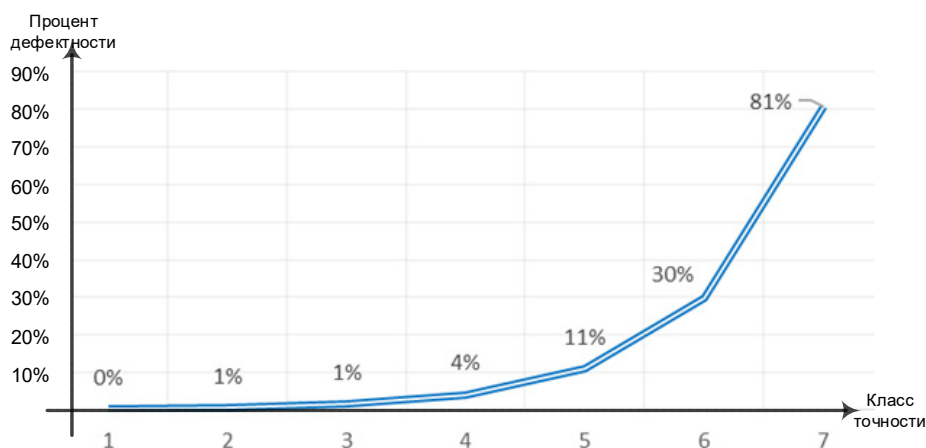


Рис. 1. Пример «точки перегиба» в зависимости от уровня дефектов при повышении сложности многослойных печатных плат

Каждое контрактное производство печатных плат обладает определенным уровнем технологий. Уровень технологии производства печатной платы

соотносится с уровнем сложности данной печатной платы, где данное соотношение определяет «точку перегиба» [3], по прохождению которой происходит значительный рост себестоимости производства печатной платы. Так, например, если предприятию необходимо переходить с производства печатных плат 4–5 класса точности на 6 и 7, то необходимо сделать акцент на переоснащении, а не на увеличении производственных мощностей. Ситуация, когда предприятие изготавливает печатные платы, на которых оно не специализируется, определяет высокий уровень дефектности данных печатных плат. Следствие из закона Мура по «специализации и зачистке потенциальных дефектов» объясняет увеличение себестоимости производства печатных плат в подобной ситуации. Для предприятий встает вопрос заблаговременного выявления «проблемных» печатных плат для точечного запуска процедуры «зачистки потенциальных дефектов» по этим печатным платам.

Определение расчетной надежности технологического процесса производства печатной платы

Надежность печатной платы определяется через прогнозирование интенсивности ее отказов. Авторы, связывая кривую интенсивности отказов печатной платы с ее жизненным циклом, выделяют период от t_0 до t_1 , для которого определяют формулу надежности производства печатной платы $P_{пр}$.

Уровень явных и скрытых дефектов напрямую связан с частотой отказов печатных плат на их жизненном цикле, т.е. за период от t_0 до t_3 (рис. 2). Зависимость частоты отказов от времени $f(t)$ определяется формулой (1) и отображается комбинированной экспоненциальной кривой изменения частоты отказов печатных плат во времени [4]:

$$f(t) = \frac{d}{dt} Q(t) = -\frac{d}{dt} P(t). \quad (1)$$

Переводя экспоненциальную кривую частоты отказов от времени $f(t)$ в кривую интенсивности отказов от времени $\lambda(t)$, получаем график, представленный на рис. 2, где $\lambda(t) \approx f(t)$.

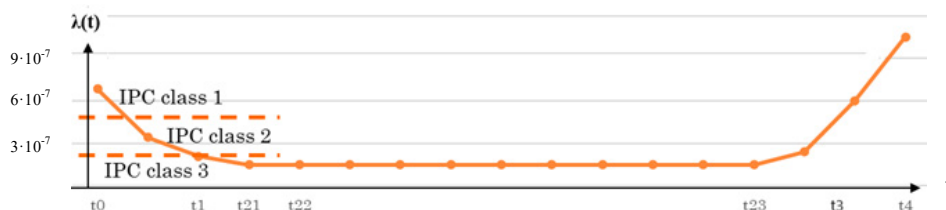


Рис. 2. Кривая интенсивности отказов

Кривую интенсивности отказов авторы охарактеризовали через жизненный цикл печатной платы:

Первый период от t_0 до t_1 : изготовление и испытание работоспособности печатных плат в контрактном производстве. В данный период количество выявленных дефектов (которые могут привести к отказам) высокое. В течение короткого промежутка времени от t_0 до t_1 (рис. 2) частота потенциальных

отказов, связанных с выявлением дефектов, резко уменьшается. Это уменьшение обеспечивается тщательной отбраковкой печатных плат на каждом промежуточном этапе их производства. При этом уровень «зачистки» потенциальных отказов тем выше, чем ниже технологический уровень конкретного производства печатных плат.

Второй период от t_1 до t_{21} : входной контроль печатных плат у заказчика. В данный период заказчик может выявить дополнительные печатные платы с потенциальными дефектами, чтобы минимизировать отказы печатных плат на третьем и четвертом этапах. Момент времени t_1 соответствует началу срока гарантийных обязательств контрактного производства печатных плат.

Третий период от t_{21} до t_{22} : изготовление электронных ячеек на базе печатных плат, монтаж ячеек в изделия, технологическая тренировка изделия у заказчика. Период от t_{21} до t_{22} определяется поверхностным монтажом компонент на печатную плату, сборкой и испытанием изделия, в которое входит печатная плата. В данный период вероятность отказов (следовательно и интенсивность отказов) минимальна, так как частота потенциальных отказов в промежуток времени от t_0 до t_{21} уменьшается экспоненциально. Момент времени t_{22} соответствует началу срока гарантийных обязательств на изделие, в состав которого входит печатная плата. Отказы в этот период обусловлены поверхностным монтажом, когда плата при волновой пайке нагревается до температуры 250 °С. В источниках [4, 5] период с t_1 по t_{22} (рис. 2) называют «приработкой» печатной платы.

Четвертый период от t_{22} до t_{23} : эксплуатация изделия, в состав которого входит печатная плата. В период от t_{22} до t_{23} продолжает действовать гарантия на печатную плату. В данный период надежность печатной платы должна быть максимальной. Момент времени t_{23} соответствует окончанию срока гарантийных обязательств на изделие и на печатную плату, которая входит в изделие. Интервал времени от t_{22} до t_{23} – рабочая область изделий – характеризуется постоянной или незначительно изменяющейся интенсивностью отказов. Отказы в этот период обусловлены неожиданными изменениями условий эксплуатации, например: резкими колебаниями температуры, случайно возникшими вибрациями, ударами и т.п.

Пятый период от t_{23} до t_3 : постгарантийная эксплуатация изделия, в состав которого входит печатная плата. Характеризуется увеличением частоты отказов за счет износа и старения элементов в печатной плате. Физические причины отказов в этот период обусловлены постепенно нарастающими физико-химическими изменениями в печатной плате, например постепенным нарушением защитных покрытий. Отказы, происходящие после времени t_3 , определяют срок службы изделия, в которое входит печатная плата, после которого оно не обеспечивает надежной работы и должно быть заменено.

Шестой период от t_3 до t_4 : вывод из эксплуатации изделия и утилизация печатной платы, входящей в данное изделие.

Как видно из рис. 2, выявляемые дефекты связаны с классом приемки (первым, вторым и третьим), зависящим от требований к надежности изделия, в состав которого входит печатная плата. Максимальное количество дефектов при изготовлении сложных многослойных печатных плат выявляется при втором классе приемки (IPC class 2). Однако, если необходимо повысить надежность печатной платы, то используют усиленную процедуру контроля

качества третьего класса приемки (IPC class 3)¹. В этом случае бракуют также «рабочие» печатные платы, имеющие дефекты, которые в период эксплуатации печатной платы могут спровоцировать отказ изделия.

Интенсивность отказов позволяет судить о надежности печатной платы. Основные факторы, влияющие на расчетную надежность печатной платы (ПП), делятся на три группы [5]: конструкторские, производственные, эксплуатационные, и рассчитывается по формуле

$$P(T) = P_{\text{констр}} \cdot P_{\text{пр}} \cdot P_{\text{э}}(T). \quad (2)$$

Для периода с t_0 по t_1 авторы предлагают принять $P_{\text{э}}(t_0, t_1) = 1$ и руководствоваться формулой

$$P(T) \approx P(t_0, t_1) = P_{\text{констр}} \cdot P_{\text{пр}}; \quad (3)$$

$$P_{\text{пр}} = \begin{cases} \frac{P_{\text{м}} \cdot P_{\text{тп}}}{C_{\text{кач}}}, & \text{если } \frac{P_{\text{тп}}}{C_{\text{кач}}} < 1, \\ P_{\text{м}}, & \text{если } \frac{P_{\text{тп}}}{C_{\text{кач}}} \geq 1, \end{cases} \quad (4)$$

где $P_{\text{м}}$ – надежность базовых материалов и «химии» для мокрых технологических операций в процессе производства печатных плат (основываясь на анализе выявления несоответствий базового материала, предлагается принять $P_{\text{м}} = 0,995$); $P_{\text{тп}}$ – надежность технологического процесса производства печатных плат определяется уровнем отработки технологического процесса, техническим уровнем оборудования, уровнем кадров; $C_{\text{кач}}$ – коэффициент «зачистки» потенциальных дефектов печатных плат, связанный с использованием процедуры контроля качества [6], рассчитывается по формуле

$$C_{\text{кач}} = 1 + \frac{\ln P(t)}{\beta_{cl}}, \quad (5)$$

где β_{cl} определяет технологический уровень контрактного производства для заданного класса точности печатной платы и класса входного контроля у Заказчика – от низкого уровня (0,03) до высокого уровня (1,0), определение которого базируется на следствии из закона Мура.

Авторы предлагают надежность технологического процесса производства ПП $P_{\text{тп}}$ рассчитывать по следующей формуле:

$$P_{\text{тп}} = \frac{P(T) \cdot C_{\text{кач}}}{P_{\text{м}} \cdot P_{\text{констр}}}. \quad (6)$$

Для печатных плат, которые отработаны и запускаются в производство не первый раз (для которых конструкторские недоработки уже устранены),

¹ IPC-A-600G. Acceptability of Printed Boards. Association Connecting Electronics Industries, 2004. 140 p.; IPC-6012D. Qualification and Performance Specification for Rigid Printed Boards. Association Connecting Electronics Industries, 2015. 52 p.

авторы предлагают принять $P_{\text{констр}} = 1,0$. Таким образом, авторы упрощают формулу (6) и получают следующую формулу:

$$P_{\text{тп}} = \frac{P(T) \cdot C_{\text{кач}}}{0,995 \cdot 1,0}. \quad (7)$$

Авторы статьи ранее рассматривали прогнозирование уровня отказов и надежности печатных плат в зависимости от конструкторских параметров [7], что предлагается использовать при определении надежности технологического процесса $P_{\text{тп}}$. Вопросы технологического уровня производства печатных плат авторы более подробно рассмотрят в отдельной статье.

Прогнозирование уровня дефектов печатных плат на этапе производства

Перейдем от прогнозирования надежности технологического процесса производства печатной платы к прогнозированию уровня дефектов $Q_{\text{тп}}$ процесса изготовления печатной платы. Прогнозируемый уровень дефектов $Q_{\text{тп}}$ печатной платы является критерием оценки как технологического процесса производства, так и контроля, и испытания печатной платы. Требования к контролю печатных плат строятся на основе отечественных стандартов¹ и международного стандарта серии IPC.

Авторы предлагают уровень дефектов производства печатной платы рассчитывать по формуле

$$Q_{\text{тп}} = 1 - P_{\text{тп}}. \quad (8)$$

Если расчетный процент потенциальных дефектов печатной платы $Q_{\text{тп}}$ лежит в диапазоне от 0 до 3,0 %, то контрактное производство печатных плат может осуществлять технологический контроль процесса производства печатных плат в соответствии с требованиями IPC class 1 («простая продукция»).

Если $Q_{\text{тп}}$ лежит в диапазоне от 3,1 до 10,0 %, то контрактное производство должно осуществлять технологический контроль процесса производства печатных плат в соответствии с требованиями не ниже IPC class 2 («коммерческая продукция средней сложности»).

Если $Q_{\text{тп}}$ лежит в диапазоне от 10,1 % и выше (например, при $Q_{\text{тп}} = 25,5 \%$), то контрактное производство должно осуществлять технологический контроль процесса производства печатных плат в соответствии с требованиями IPC class 3 («сложная продукция, требующая повышенной надежности»).

Для приемки IPC class 2 и class 3 понятие «технологического отхода», помимо «остатков» сырья (например, остатков стеклотекстолита), включает дефектные платы по «зачистке» в том числе скрытых дефектов.

¹ ГОСТ Р 55490–2013. Платы печатные. Общие технические требования к изготовлению и приемке, ГОСТ Р 55693–2013. Платы печатные. Технические требования, ГОСТ Р 55744–2013. Платы печатные. Методы испытаний физических параметров, ГОСТ Р 56251–2014. Платы печатные. Классификация дефектов.

Реальная надежность производства $P_{\text{фпп}}(t_1, t_{21})$ и фактический процент брака $Q_{\text{фпп}}$ рассчитывается по следующим формулам:

$$P_{\text{фпп}}(t_1, t_{21}) = n(t_1, t_{21}) / N(T), \quad (9)$$

где $n(t_1, t_{21})$ – число годных ПП, признанных заказчиком за отрезок времени от t_1 до t_{21} :

$$n(t_1, t_{21}) = \sum_{i=1}^k n_i, \quad (10)$$

$N(T)$ – число запущенных в производство ПП:

$$N(T) = [N_1(T) + \dots + N_i(T)], \quad (11)$$

$N_1(T)$ – число запущенных ПП в 1-й партии; $N_i(T)$ – число запущенных ПП в i -й партии;

$$Q_{\text{фпп}} = 1 - P_{\text{фпп}}(t_1, t_{21}). \quad (12)$$

Апробация системы уравнений расчета уровня дефектов производства печатных плат

Авторы для апробации системы уравнений расчета уровня дефектов производства печатных плат спрогнозировали технологический уровень контрактного производства β_{cl} печатных плат (табл. 1) для выбранного производства. Так, например, для двухслойных печатных плат 2–3-го класса точности $C_{\text{кач}} = 0,97$, т.е. в среднем бракуется не более 3 % плат от общего количества запущенных в производство простых печатных плат. Скрытые дефекты в готовой продукции отсутствуют. Для двухслойных и многослойных печатных плат 4–5-го класса точности с усилением контроля качества (оптический контроль, электропрозвонка, рентгеновский контроль [8]) $C_{\text{кач}} = 0,90$, когда выявляется не более 10 % дефектных плат от общего количества запущенных в производство. При этом возможны скрытые дефекты в готовой продукции, но не более 0,1 %. Данные дефекты выявляются при входном контроле у Заказчика и/или при поверхностном монтаже компонент на печатную плату. Для сложных плат класса точности от 5+ до 7, а также для плат 4–5-го класса точности с повышенными требованиями к надежности, когда скрытые дефекты не должны превышать 0,001 %, $C_{\text{кач}} = 0,75$, т.е. более 25 % плат (от общего количества запущенных в производство) определяются как имеющие дефекты. В этом случае процедура контроля усиливается контролем внутреннего состояния многослойной печатной платы (например, по микрошлифтам, контролю импеданса).

В качестве входных данных приведем двадцать характеристик двух печатных плат (табл. 2), данные рис. 3 и 4, а также технологический уровень производства. Спрогнозируем потенциальную интенсивность отказов при эксплуатации платы в изделии (итоги табл. 2).

Таблица 1

Определение условно постоянного параметра β_{cl}
для конкретного контрактного производства печатных плат

Класс точности ПП	4	5	5+	6	7
Показатель технологического уровня контрактного производства печатных плат (β_{cl})	от 1 до 0,4	от 0,5 до 0,2	от 0,3 до 0,1	от 0,2 до 0,05	от 0,1 до 0,03

Таблица 2

Параметры печатных плат №1 и №2

Описание параметра	ЕИ	Значение платы № 1	Значение платы № 2
1. Эксплуатация ПП: аппаратура, используемая в режиме стационарного применения в помещениях		1	1
2. Число слоев в ПП	шт.	6	8
3. Количество сквозных металлизированных отверстий, пропаянных волной	шт.	2145	1018
4. Количество сквозных металлизированных отверстий, пропаянных ручной пайкой	шт.	96	6
5. Количество монтажных и служебных отверстий	шт.	106	14
6. Табличная температура окружающей среды при эксплуатации	°C	30	30
7. Температура вблизи печатной платы по наиболее теплонагруженному элементу на ПП	°C	70	60
8. Площадь платы	см ²	528,138	147,84
9. Толщина ПП	Мм	1,6	1,5
10. Преимущественная ширина печатного проводника	Мм	0,1	0,1
11. Минимальный диаметр сквозных неметаллизированных отверстий	Мм	0,2	0,3
12. Количество слоев жидкой защитной маски	шт.	2	2
13. Слои шелкографии	шт.	2	2
14. Площадь иммерсионного золочения	дм ²	7,4	0,0
15. Площадь финишного покрытия олово-свинец	дм ²	0,0	2,1
16. Класс точности печатной платы		5+	5
17. Количество соединений для элементов печатной платы, пропаянных «пайка волной»	шт.	1072	509
18. Количество соединений для элементов печатной платы, пропаянных ручным способом	шт.	48	5
19. Класс IPC использования и приемки у Заказчика		3	2
20. Гарантийный срок службы ПП в изделии ΔT	ч	26280	26280
I. Расчетный уровень отказов λ'' ,	1/ч	$9,17 \cdot 10^{-7}$	$3,42 \cdot 10^{-7}$
II. Расчетная надежность работы платы $P(T)$	%	97,62	99,1
III. Расчетная вероятность отказов платы $Q(T)$	%	2,38	0,9
IV. Расчетная вероятность выявления дефектов в процессе производства ПП при текущем техническом уровне $Q_{тп}$	%	25,5	3,4

сл 1/0	МЕДНАЯ ФОЛЬГА НТЕ JINBAO, 18 МКМ, ШИРИНА РУЛОНА 650 ММ	0,018
	Препрег 2116-ЭМ-5 РАЗМЕР 1.260 М (РУЛОН)	0,133
	Препрег 2116-ЭМ-5 РАЗМЕР 1.260 М (РУЛОН)	0,133
сл 2/3	СТЕКЛОТЕКСТОЛИТ ФОЛЬГИРОВАННЫЙ СТФ-Д-0,300-35-ЭМ-5 (1220x1020 ММ)	0,37
	Препрег 2116-ЭМ-5 РАЗМЕР 1.260 М (РУЛОН)	0,133
	Препрег 2116-ЭМ-5 РАЗМЕР 1.260 М (РУЛОН)	0,133
сл 4/5	СТЕКЛОТЕКСТОЛИТ ФОЛЬГИРОВАННЫЙ СТФ-Д-0,300-35-ЭМ-5 (1220x1020 ММ)	0,37
	Препрег 2116-ЭМ-5 РАЗМЕР 1.260 М (РУЛОН)	0,133
	Препрег 2116-ЭМ-5 РАЗМЕР 1.260 М (РУЛОН)	0,133
сл 6/0	МЕДНАЯ ФОЛЬГА НТЕ JINBAO, 18 МКМ, ШИРИНА РУЛОНА 650 ММ	0,018

Рис. 3. Раскладка слоев для платы № 1

сл 1/0	СТЕКЛОТЕКСТОЛИТ ФОЛЬГИРОВАННЫЙ СТФ-Д-0,100-18-ЭМ-5 (1220x1020 ММ)	0,136
	Препрег 2116-ЭМ-5 РАЗМЕР 1.260 М (РУЛОН)	0,133
сл 2/3	СТЕКЛОТЕКСТОЛИТ ФОЛЬГИРОВАННЫЙ СТФ-Д-0,200-18-ЭМ-5 (1220x1020 ММ)	0,236
	Препрег 2116-ЭМ-5 РАЗМЕР 1.260 М (РУЛОН)	0,133
сл 4/5	СТЕКЛОТЕКСТОЛИТ ФОЛЬГИРОВАННЫЙ СТФ-Д-0,200-18-ЭМ-5 (1220x1020 ММ)	0,236
	Препрег 2116-ЭМ-5 РАЗМЕР 1.260 М (РУЛОН)	0,133
сл 6/7	СТЕКЛОТЕКСТОЛИТ ФОЛЬГИРОВАННЫЙ СТФ-Д-0,200-18-ЭМ-5 (1220x1020 ММ)	0,236
	Препрег 2116-ЭМ-5 РАЗМЕР 1.260 М (РУЛОН)	0,133
сл 8/0	СТЕКЛОТЕКСТОЛИТ ФОЛЬГИРОВАННЫЙ СТФ-Д-0,100-18-ЭМ-5 (1220x1020 ММ)	0,136

Рис. 4. Раскладка слоев для платы № 2

Используя формулы из предыдущей статьи авторов [7], рассчитаем расчетную вероятность отказа печатной платы $Q(T)$ и расчетную надежность печатной платы $P(T)$, занесем эти результаты в табл. 2. Для многослойной печатной платы № 1 $Q(T) = 2,38 \%$, $P(T) = 97,62$. Для многослойной печатной платы № 2 $Q(T) = 0,9 \%$, $P(T) = 99,1$.

Расчетная надежность печатной платы зависит только от конструкторских параметров. Тогда как количество выявленных дефектов зависит также и от технического уровня конкретного контрактного производства печатных плат. В табл. 3 приведен расчет надежности для сложной многослойной печатной платы № 1 по факту:

$$P_{\text{фгп}}(t_1, t_{21}) = 0,726 \text{ или } 72,6 \% ; Q_{\text{фгп}} = 1 - 0,726 = 0,274 \text{ или } 27,4 \% .$$

Расчетный процент дефектов $Q_{\text{гп}}$ составил 25,5 % (который занесли в табл. 2). Данное значение релевантно фактическому, но более чем в 2 раза превышает нормативное, что свидетельствует о необходимости «точечного

подхода», разработки и внедрения мероприятий по данной печатной плате в рамках действия периода точки перегиба. Данный вывод подтверждается результатом анализа характеристик печатной платы, когда фиксируется увеличение сложности платы № 1 (по сравнению с характеристиками платы 5-го класса точности) – одна из характеристик платы соответствует требованиям 6-го класса точности.

Таблица 3

Итоги производства печатной платы № 1

Результаты производства и контроля качества печатных плат	Кол. ПП	Надежность по итогам входного контроля Заказчика
1. Заявка клиента на производство ПП	192	
2. Запуск с учетом технологический отхода и кратности заготовки	212	
3. Отбраковка ПП как технологический отход $n_1(t_0, t_1)$	20	
4. Отбраковка ПП как брак $n_2(t_0, t_1)$	10	
5. Отгрузка ПП клиенту как годный продукт	182	
6. Осталось в незавершенном производстве	0	
7. Получение Клиентом ПП и входной контроль $N_1(T)$	182	
8. Возврат ПП в контрактное производство по рекламации	28	
9. Годные по результатам входного контроля ПП $n_1(T)$	154	0,726
10. Компенсация ПП (по браку и рекламации), дозапуск ПП	38	

Таблица 4

Итоги производства печатной платы № 2

Результаты производства и контроля качества печатных плат	Кол. ПП	Надежность по итогам входного контроля Заказчика
1. Заявка клиента на производство ПП	910	
2. Запуск с учетом технологический отхода и кратности заготовки	1008	
3. Отбраковка ПП как технологический отход $n_1(t_0, t_1)$	42	
4. Отгрузка ПП клиенту как годный продукт	910	0,903
5. Осталось в незавершенном производстве	56	0,958
6. Получение Клиентом ПП и входной контроль $N_1(T)$	910	
7. Возврат ПП в контрактное производство по рекламации	0	
8. Годные по результатам входного контроля ПП $n_1(T)$	910	1

В отсутствие прогнозирования уровня дефектов контрактному производству приходится 3 и более раз запускать в производство партии сложных

многослойных печатных плат, что растягивает срок исполнения заказа более чем в 3 раза и ведет к существенному росту расходов.

В табл. 4 приведен расчет надежности для многослойной печатной платы № 2.

Без учета незавершенного производства $Q_{фпп} = 1 - 0,903 = 0,097$, или 9,7 %. С учетом незавершенного производства $Q_{фпп} = 1 - 0,958 = 0,042$, или 4,2 %. Расчетный процент дефектов $Q_{пп}$ составил 3,4 % (который отражен в табл. 2). Характеристики печатной платы определяют ее отнесение к 5-му классу точности, объемы производства которого ранее доминировали в анализируемом контрактном производстве, что подтверждает отсутствие точки перегиба для плат подобной сложности. Также отметим, что расчетный уровень дефектов по данной печатной плате не противоречит фактическому проценту дефектов и находится в пределах нормативного технологического отхода.

Заключение

При переходе на производство более сложных печатных плат их себестоимость возрастает из-за зачистки потенциальных дефектов. Для рассмотренного в статье контрактного производства «точка перегиба» связана с производством многослойных печатных плат 5+ и 6-го класса точности. Переходя «точку перегиба» при наращивании объема производства печатных плат 5+ и 6-го класса точности с одновременным доминированием технологического уровня для 5-го и 4-го класса точности печатных плат, в контрактном производстве увеличиваются дефекты. Авторы разработали систему уравнений для расчета уровня дефектов, использование которой позволит производителю печатных плат заблаговременно оценить «точку перегиба» и внедрить «точечные» мероприятия по снижению потерь в разрезе конкретных печатных плат.

Список литературы

1. Вернер В., Кузнецов Е., Сауров А. Закону Мура 50 лет: завершение или изменение? // Наноиндустрия. 2015. № 6 (60). С. 50–62.
2. Dorsch J. The End of Scaling? URL: <http://electroiq.com/mysemicondaily/2014/07/09/>
3. Martin B. Are We At an Inflection Point with Silicon Scaling and Homogeneous ICs? URL: <http://semimd.com/blog/2014/10/15/>
4. Астахов В. П. Основы надежности электронно-оптических приборов. М. : МГУПИ, 2007. 62 с.
5. Гормаков А. Н., Воронина Н. А. Конструирование и технология электронных устройств приборов. Печатные платы : учеб. пособие. Томск : Изд-во ТПУ, 2006. 164 с.
6. Чиминев А. Печатные платы – ключевой компонент, определяющий надежность конечного продукта // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2020. № 6. С. 42–46.
7. Трошин А. А., Балахонова И. В. Совершенствование математической модели прогнозирования отказов печатных плат // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2024. № 4. С. 19–29.
8. 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.

References

1. Verner V., Kuznetsov E., Saurov A. Moore's law at 50: end or change? *Nanoindustriya = Nanoindustry*. 2015;(6):50–62. (In Russ.)
2. Dorsch J. *The End of Scaling?* Available at: <http://electroi.com/mysemicondaily/2014/07/09/>
3. Martin B. *Are We At an Inflection Point with Silicon Scaling and Homogeneous ICs?* Available at: <http://semimd.com/blog/2014/10/15/>
4. Astakhov V.P. *Osnovy nadezhnosti elektronno-opticheskikh priborov = Fundamentals of reliability of electronic-optical devices*. Moscow: MGUPI, 2007:62. (In Russ.)
5. Gormakov A.N., Voronina N.A. *Konstruirovaniye i tekhnologiya elektronnykh ustroystv priborov. Pechatnye platy: ucheb. posobie = Design and technology of electronic devices and instruments. Printed circuit boards: textbook*. Tomsk: Izd-vo TPU, 2006:164. (In Russ.)
6. Chiminev A. Printed circuit boards are a key component that determines the reliability of the final product. *Elektronika: Nauka, Tekhnologiya, Biznes = Electronics: science, technology, business*. 2020;(6):42–46. (In Russ.)
7. Troshin A.A., Balakhonova I.V. Improving the mathematical model for predicting printed circuit board failures. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Po-volzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2024;(4):19–29. (In Russ.)
8. 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.) = Current issues in radio electronics and telecommunications: proceedings of the All-Russian scientific and engineering conference (Samara, May 15–17, 2018)*. Samara: Ofort, 2018:176–177. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Алексей Алексеевич Трошин

генеральный директор,

АО «ПО «Электроприбор»

(Россия, г. Пенза, пр-кт Победы, 69)

E-mail: mail@electropribor-penza.ru

Aleksey A. Troshin

General director, JSC “PO “Electropribor”

(69 Pobedy avenue, Penza, Russia)

Ирина Владимировна Балахонова

кандидат экономических наук, доцент,

доцент кафедры приборостроения,

Пензенский государственный

университет (Россия, г. Пенза,

ул. Красная, 40)

E-mail: i.v.balachonova@mail.ru

Irina V. Balakhonova

Candidate of economic sciences,

associate professor, associate professor

of the sub-department of instrument

engineering, 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 23.02.2025

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 03.03.2025

Принята к публикации / Accepted 10.04.2025