

## Вероятностный подход к оценке качества проведения операции фотолитографии при производстве печатных плат

М. А. Коробков<sup>✉</sup>, В. С. Барабанов

Московский авиационный институт  
(национальный исследовательский университет), Москва, Россия

<sup>✉</sup> josef\_turok@bk.ru

### Аннотация

**Введение.** Тенденции к миниатюризации электронных устройств в совокупности с увеличением их вычислительных мощностей приводят к повышению плотности трассировки печатных узлов и уменьшению размеров элементов проводящего рисунка: дорожек и зазоров между ними, контактных площадок компонентов и переходных отверстий. Увеличение плотности межсоединений – причина снижения надежности устройств, а также роста брака при производстве. Актуальной задачей является создание способов, которые позволят количественно оценить возможность изготовления заготовок или печатных плат, соответствующих требованиям приемки, в зависимости от параметров их конструкции и характеристик технологического процесса. Поскольку существенную долю дефектов вносит процесс фотолитографии, особо важной является априорная оценка степени дефектности перед изготовлением и определение на основе оценки способов для уменьшения количества дефектов.

**Цель работы.** Разработка и экспериментальная проверка математической модели вероятности выхода годных заготовок печатных плат для процесса фотолитографии.

**Материалы и методы.** Проведен анализ причин возникновения дефектов в процессе фотолитографии, на основе которого определены технологические параметры, позволяющие количественно охарактеризовать величину дефекта: искажение размеров проводящего рисунка и неровность края проводника. Предложена математическая модель, описывающая вероятность бездефектного изготовления заготовки. В качестве основных оцениваемых конструктивных параметров печатной платы выбрана ширина проводника и размер зазора между проводниками. Используемые в модели требования к печатной плате определены на основе международных стандартов по их проектированию и приемке.

**Результаты.** Разработана методика экспериментальной проверки предложенной вероятностной модели с помощью цифровой обработки и статистического анализа изображений фотошаблонов и заготовок. Подтверждена адекватность модели для лабораторной производственной линии. Для исследуемой операции определены зависимости технологических параметров от проектируемой ширины проводника и проведена корректировка процесса, позволившая увеличить вероятность выхода годных заготовок.

**Заключение.** Результаты расчета вероятности, полученные с помощью модели, могут служить индикатором необходимости внесения изменений в конструкцию печатного узла или элементом оценки рисков и размера резервов, требуемых для производства образцов высокой сложности для предприятия-изготовителя.

**Ключевые слова:** печатные платы, надежность электроники, оценка надежности, фотолитография, анализ выхода годных заготовок печатных плат, производство печатных плат

**Для цитирования:** Коробков М. А., Барабанов В. С. Вероятностный подход к оценке качества проведения операции фотолитографии при производстве печатных плат // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2025. Т. 28, № 1. С. 17–34. doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-1-17-34

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Источник финансирования.** Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 23-29-10204.

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность канд. техн. наук, доценту, заведующему кафедрой 307 "Цифровые технологии и информационные системы" МАИ Ф. В. Васильеву, а также канд. техн. наук, доценту, доценту этой же кафедры С. В. Ванцову за значимые замечания и советы при проведении исследования и оформлении статьи.

Статья поступила в редакцию 19.07.2024; принята к публикации после рецензирования 19.09.2024; опубликована онлайн 28.02.2025



## Probabilistic Approach to Assessing Photolithography Quality in the Production of Printed Circuit Boards

Maksim A. Korobkov <sup>✉</sup>, Vasilii S. Barabanov

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

<sup>✉</sup> josef\_turok@bk.ru

### Abstract

**Introduction.** The current trend in the production of miniaturized electronic devices with improved computing power and performance leads to an increase in the density of interconnections on printed circuit boards (PCBs) and a reduction in the dimensions of such conductive pattern elements, as tracks and gaps, contact pads of components and vias. At the same time, the growing interconnection density decreases the reliability of devices and increases the number of defects in production. In this connection, the development of approaches to quantitative evaluation of the manufacturability of PCB blanks that meet the acceptance criteria represents a relevant research task. A significant share of defects is introduced at the photolithography stage; therefore, an a priori estimation of the number of defects before fabrication and determination of approaches to their reduction are of particular significance.

**Aim.** Development and experimental verification of an analytical model for determining the yield probability of PCB blanks of acceptable quality for the photolithography stage.

**Materials and methods.** An analysis of reasons for emergence of defects in the process of photolithography was conducted. On this basis, the manufacturing parameters that describe the defect value, i.e., conductive pattern distortion and conductor edge roughness, were established. A mathematical model describing the probability of defect-free manufacturing of PCB blanks was proposed. Conductor width and conductor gap size were used as estimated design parameters of PCBs. The quality criteria for the design and acceptance of PCBs were determined based on international standards.

**Results.** A methodology for experimental verification of the proposed probabilistic model by means of processing and statistical analysis of photomask and blank images was developed. Difficulties associated with the creation of datasets and their processing were considered. The adequacy of the model for a laboratory production line was confirmed. For the investigated process, the dependencies of manufacturing parameters on the designed conductor width were determined and the corresponding adjustments of the process were introduced. This allowed the probability of obtaining PCB blanks of acceptable quality to be increased.

**Conclusion.** The results of probability calculations obtained using the proposed model can be used as an indicator of required changes in the design of a printed assembly or for assessing the risks and reserves required by the manufacturer for the production of high-complexity specimens.

**Keywords:** printed circuit boards, PCBs, electronics reliability, reliability estimation, photolithography, PCB blank yield analysis, manufacturing design

**For citation:** Korobkov M. A., Barabanov V. S. Probabilistic Approach to Assessing Photolithography Quality in the Production of Printed Circuit Boards. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2025, vol. 28, no. 1, pp. 17–34. doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-1-17-34

**Conflict of interest.** The authors declare no conflicts of interest.

**Source of funding.** This work was supported financially by Russian Science Foundation under Scientific Project No. 23-29-10204.

**Acknowledgements.** The authors would like to express their acknowledgements to Fedor V. Vasilyev, Dr Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of Department 307 "Digital Technologies and Information Systems" of MAI, and to Sergey V. Vantsov, Dr Sci. (Eng.), Associate Professor, of the same department for significant comments and suggestions during the research and preparation of the article.

Submitted 19.07.2024; accepted 19.09.2024; published online 28.02.2025

**Введение.** Создание современной электронной техники требует разработки новых методов производства печатных плат. В настоящее время электронная промышленность раз-

вивается в направлении увеличения производительности и функциональности. При этом требования к массогабаритным характеристикам производимого оборудования ужесточаются.

Очевидным решением сложившегося технического противоречия – одновременного увеличения функциональности и уменьшения размеров – является увеличение количества и плотности межсоединений и уменьшение размеров проводящего рисунка печатных плат, что приводит к увеличению количества дефектной продукции и, следовательно, к нерациональному использованию ресурсов и экономическим потерям [1, 2]. В связи с этим повышается актуальность исследований путей уменьшения и предупреждения брака на предприятиях электронной промышленности.

Указанной теме посвящено немало работ [3–7], в которых предложены различные модели, методы и подходы к увеличению доли выхода годной продукции на всех этапах ее производства. Для этих же целей во всех современных средствах автоматизированного проектирования существуют подсистемы, в которых конструктору необходимо задавать правила, обоснованные ограничениями соответствующих производственных процессов. Однако существующие методы не дают ответа на вопрос о том, получится ли изготовить устройство, и тем более не позволяют получить какую-либо количественную оценку возможности изготовления, а предоставляют лишь рекомендации, относящиеся к тому или иному этапу жизненного цикла изделия без какой-либо связи между собой. Для определения возможности изготовления печатных плат на производстве чаще всего используются два подхода: первый полагается на экспертную оценку, а второй – на экспериментальные данные [8–10]. Таким образом, возможности производства определяются исключительно

технологом вручную без существенных средств автоматизации, а при вводе в эксплуатацию нового производства, участка или операции требуется проведение большого количества экспериментов, чтобы получить новый опыт, так как каждое производство по-своему уникально.

Поэтому возникает необходимость создания способов, позволяющих количественно оценить возможность изготовления годной печатной платы при различных условиях. В настоящей статье предложен подход, основанный на использовании аналитической модели для расчета вероятности изготовления печатной платы, соответствующей действующим стандартам проектирования и приемки IPC-6012B [11] и IPC-A-600G [12], определяющим конкретные количественные критерии качества для печатных плат [13]. Модель (рис. 1) предполагает определение соотношений между заданными правилами проектирования электронного устройства (вход), характеристиками производственного процесса (механизм) и требованиями существующих стандартов (контроль), чтобы рассчитать вероятность получения продукта (выход), соответствующего требованиям.

При изготовлении печатных плат одним из важнейших процессов производства является перенос рисунка проводников на заготовку посредством нанесения фоточувствительного материала на заготовку с последующим воздействием на него ультрафиолетовым излучением и проявлением, т. е. процесс фотолитографии. Именно этот процесс в большей степени определяет минимально воспроизводимые параметры проводящего рисунка и влияет на возникновение дефектов в процессе их производства. С одной сто-

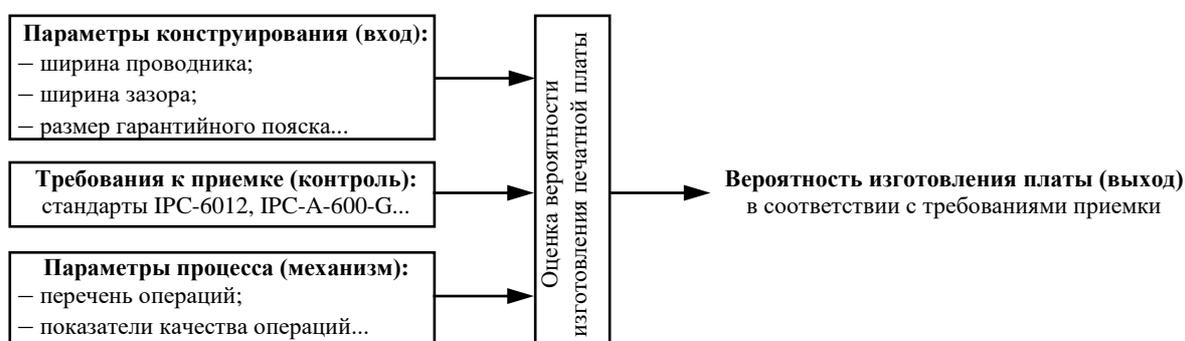


Рис. 1. Диаграмма предложенного метода оценки вероятности изготовления бездефектной печатной платы в соответствии с методологией IDEF0

Fig. 1. Top-level diagram of the proposed method for yield probability estimation of defect-free PCBs in accordance with the IDEF0 methodology



Рис. 2. Этапы процесса фотолитографии, причины и параметры дефектов  
 Fig. 2. Steps of photolithography process, defect causes and defect parameters

роны, в указанном процессе можно принять меры к устранению дефектов, полученных на проведенных ранее технологических операциях, например механической обработки, с другой – фотолитография является источником дефектов, обнаружение которых затруднительно и зачастую происходит на последующих операциях, например после травления. Поэтому особо важным является наличие априорной оценки дефектности перед изготовлением для процесса фотолитографии, а также использование этой оценки для определения способов уменьшения количества дефектов на выпускаемой продукции.

**Построение модели получения годной заготовки в процессе фотолитографии.** Для определения параметров конструкции печатной платы и технологического процесса, влияющих на вероятность изготовления платы в соответствии с требованиями приемки, проведена декомпозиция процесса фотолитографии на этапы (рис. 2).

Для каждого этапа определены основные причины возникновения дефектов. С помощью группировки этих причин определены параметры, которыми могут быть описаны дефекты. Также для каждого из параметров определены количественные показатели, использование которых возможно при построении моде-

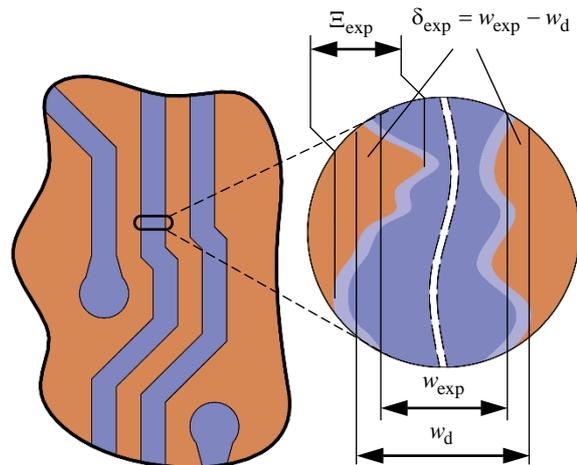


Рис. 3. Параметры искажения размеров  $\delta_{exp} = w_{exp} - w_d$  проводящего рисунка и неровности края проводника  $\Xi_{exp}$  на заготовке

Fig. 3. Parameters of distortion of the pattern dimension  $\delta_{exp} = w_{exp} - w_d$  and conductor edge roughness  $\Xi_{exp}$  on the PCB blank, describing the production of a good blank in the photolithography process:

1. Искажение размеров рисунка ( $\delta_{exp}$ ), выраженное разницей между заложенными при проектировании размерами топологического рисунка и средним значением размера на изготовленном образце, например разница между проектируемым значением ширины проводни-

ка ( $w_d$ ) и средним значением ширины покрывающей проводник после фотолитографии фоторезистивной маски ( $w_{exp}$ ) (рис. 3).

2. Неровность края проводника ( $\Xi_{exp}$ ) – параметр, характеризующий предел изменения положения края фоторезистивной маски по ее длине.

3. Несовпадение координат заготовки и маски – изменение в процессе изготовления положения элементов проводящего рисунка относительно заложенного при проектировании.

Искажение размеров рисунка и неровность края проводника имеют общие причины возникновения:

- низкую контрастность фотошаблона;
- локальные изменения топологии на фотошаблоне (артефакты), привнесенные в процессе его изготовления, эксплуатации или хранения;
- низкую адгезию фоторезиста;
- большую толщину слоя фоторезиста или неравномерность его толщины на поверхности заготовки;
- неравномерную экспозицию фоторезиста, обусловленную источником излучения;
- перетравливание или недотравливание фоторезиста в процессе проявки.

Несовпадение координат заготовки и маски, в свою очередь, является следствием:

- износа фотошаблона и изменения его геометрических размеров при изменении температуры и влажности окружения (несоблюдение условий хранения и эксплуатации);
- смещения фотошаблона;
- деформации заготовки.

Разные причины возникновения дефектов позволяют разделить параметры на две группы:

1) совокупно описывающие влияние фотолитографии на отдельные элементы топологии: искажение размеров рисунка и неровность края проводника;

2) влияние процесса на топологию в целом: несовпадение координат заготовки и маски.

Указанное несовпадение координат связано с явлением деформации, влияние которого в большей степени проявляется на операциях прессования и травления, имея похожие причины возникновения дефектов. В таком случае целесообразно построить обобщенную модель, описывающую деформацию при производстве печатных плат [14]. Построение такой модели

требует подробного рассмотрения смежных технологических процессов, что затруднительно выполнить в рамках настоящей статьи. Поэтому дальнейшее рассмотрение сосредоточено на исследовании изменения параметров отдельных элементов топологии.

При описании процесса фотолитографии использовано упрощение, определяющее проводящий рисунок как совокупность проводящих дорожек и зазоров между проводниками, которые описываются параметром ширины. Тогда основным требованием к топологии является соответствие полученных после фотолитографии значений параметра заложенным при проектировании. Так как после фотолитографии проводники отсутствуют, в качестве ширины проводника использована ширина покрывающей проводник маски.

Ширина проводника после экспонирования ( $W_{exp}$ ) является непрерывной случайной величиной, для которой может быть установлен закон распределения. Поскольку на процесс фотолитографии оказывает влияние большое количество несвязанных друг с другом факторов, то, согласно центральной предельной теореме, можно предположить, что  $W_{exp}$  подчинена нормальному закону распределения с функцией плотности:

$$f_{exp}(w) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_{exp}} \exp \left[ -\frac{(w - w_{exp})^2}{2\sigma_{exp}^2} \right],$$

где  $w$  – ширина проводника;  $w_{exp}$ ,  $\sigma_{exp}$  – математическое ожидание и среднее квадратичное отклонение ширины проводника после фотолитографии соответственно.

Математическое ожидание ( $w_{exp}$ ) и среднее квадратичное отклонение ( $\sigma_{exp}$ ), в свою очередь, связаны с определенными ранее параметрами искажения размеров рисунка:  $\delta_{exp}$  – величиной изменения среднего значения ширины проводника на заготовке после фотолитографии относительно проектируемого значения ( $w_d$ ) и неровности края проводника ( $\Xi_{exp}$ ), характеризующего разброс этой величины. Тогда математическое ожидание определяется значением проектируемой ширины проводника

с учетом влияния привносимого процессом искажения размеров топологии:

$$w_{\text{exp}} = w_d + \delta_{\text{exp}}$$

Для определения параметра  $\sigma_{\text{exp}}$  неровность воспроизведения края рассмотрена как нормально распределенная случайная величина, характеризующая нулевым значением математического ожидания (что следует из определения самой величины) и среднеквадратичным отклонением ( $\xi$ ):

$$\Xi_{\text{exp}} \in N(0, \xi^2).$$

Поскольку процесс экспонирования оказывает влияние на оба края проводника, для определения разброса ширины нужно рассмотреть композицию распределений для каждого края, тем самым сформировав результирующий закон распределения, в котором математическое ожидание и дисперсия будут равны суммам соответствующих величин. Тогда среднеквадратичное отклонение для  $W_{\text{exp}}$  составляет  $\sqrt{2} \cdot \xi$ , а закон распределения ширины проводника после фотолитографии имеет вид

$$W_{\text{exp}} \in N(w_d + \delta_{\text{exp}}, 2\xi^2).$$

При этом  $\delta_{\text{exp}}$  и  $\xi$  в общем случае зависят от параметров конструкции печатной платы (в частности, проектируемой ширины проводника), а также от характеристик процесса экспонирования.

Зная закон распределения параметра  $W_{\text{exp}}$ , необходимо определить допустимые пределы его изменения, что возможно с использованием требований стандартов по проектированию и приемке печатных плат. Так, п. 2.10.1.1 стандарта IPC-A-600G определяет допустимое изменение ширины проводника: 20 % – для плат с классом надежности 3 или 2 (оборудование ответственного назначения и промышленные устройства соответственно), в также 30 % – для класса надежности 1 (потребительские устройства). П. 2.10.1.2 указанного стандарта аналогично определяет требования к размеру зазора проводниками: 20 % – для класса надежности 3 и 30 % – для классов надежности 2 и 1.

Чтобы не рассматривать ширину проводника и ширину зазоров как отдельные случайные величины, введено ограничение: равенство проектируемых значений ширины проводника и зазора. Это ограничение в большинстве случаев справедливо для участков с максимально плотным расположением проводников, что преимущественно и определяет возможность изготовления печатной платы.

С учетом указанного ограничения сформирован общий критерий, накладывающий ограничение на изменение ширины проводника как в меньшую, так и в большую сторону. Качество технологического процесса характеризуется вероятностью попадания случайной величины  $W_{\text{exp}}$  в заданный требованиями приемки диапазон. Указанная вероятность определяется как

$$P_{\text{exp}} \{(1 - k_{\min})w_d \leq w \leq (1 + k_{\max})w_d\} = \int_{(1-k_{\min})w_d}^{(1+k_{\max})w_d} f_{\text{exp}}(w) dw, \quad (1)$$

где  $k_{\min}$ ,  $k_{\max}$  – коэффициенты пределов изменения ширины проводника в меньшую и большую сторону согласно требованиям стандарта.

В качестве примера на рис. 4 представлена плотность вероятности ширины проводника  $w_d = 250$  мкм, выполняемого по классу надежности 3 стандарта IPC-A-600G ( $k_{\min} = k_{\max} = 0.2$ ) для операции фотолитографии с искажением размеров проводящего рисунка  $\delta_{\text{exp}} = -20$  мкм и неровностью проводника  $\xi = 18$  мкм (среднеквадратичное отклонение ширины проводника после

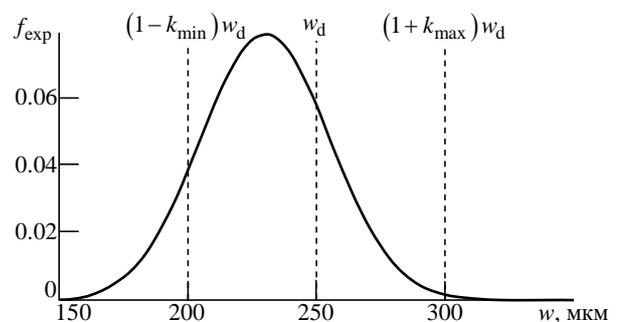


Рис. 4. Определение вероятности изготовления заготовки в соответствии с требованиями приемки

Fig. 4. Determination of the yield probability of PCB blanks in accordance with acceptance criteria

фотолитографии  $\sigma_{\text{exp}} = \sqrt{2} \cdot \xi = 25$  мкм). Вероятность бездефектного изготовления заготовки определяется площадью, ограниченной функцией плотности процесса  $f_{\text{exp}}(w)$  и осью абсцисс по вертикали и полями допуска по горизонтали.

Поскольку ширина проводника подчинена нормальному закону, при подстановке в (1) плотности распределения указанного закона  $f_{\text{exp}}(w)$  величина  $P_{\text{exp}}$  описывается разностью функций Лапласа:

$$P_{\text{exp}}(w_d, \delta_{\text{exp}}, \xi, k_{\text{max}}, k_{\text{min}}) = \Phi\left(\frac{k_{\text{max}} w_d - \delta_{\text{exp}}}{\sqrt{2} \cdot \xi}\right) - \Phi\left(\frac{-k_{\text{min}} w_d - \delta_{\text{exp}}}{\sqrt{2} \cdot \xi}\right), \quad (2)$$

где  $\Phi(\cdot)$  – нормальное интегральное распределение (функция Лапласа).

Таким образом, определив параметры  $\delta_{\text{exp}}$  и  $\xi$  для используемого процесса фотолитографии, можно рассчитать вероятность бездефектного изготовления платы в соответствии с предъявленными требованиями приемки до проведения производства. Определение параметров  $\delta_{\text{exp}}$  и  $\xi$  возможно на основе технологической документации установок экспонирования, однако, принимая во внимание изменение параметров качества процессов во времени и большое количество определяющих результат

переменных, такой способ пригоден только для приблизительных оценок. Получение более точных результатов возможно на основе проведения периодических экспериментов на используемой линии или внедрения систем контроля, обеспечивающих непрерывный анализ характеристик на основе изготавливаемой продукции. Однако возможность реального применения модели требует проверки.

**Экспериментальные исследования.** Определение параметров операции фотолитографии, а также проверка адекватности модели оценки вероятности производства заготовок в соответствии с требованиями приемки (2) осуществлено экспериментально в лабораторных условиях на участке контактного экспонирования печатных плат согласно разработанной методике.

Методика экспериментального исследования операции фотолитографии состоит из трех этапов (рис. 5).

1. Формирование исследуемой выборки. Этап включал в себя изготовление серии фотошаблонов и соответствующих им заготовок с тестовой топологией, состоящей из вертикально, горизонтально и диагонально расположенных проводников с разным значением проектируемой ширины, их оцифровку с помощью сканера, сегментацию полученных изображений для формирования группы изображений с одинаковыми параметрами и расположением проводников для обеспечения удобства обработки результатов.

2. Обработка изображений. На этом этапе на каждом изображении устранены шумы, ком-

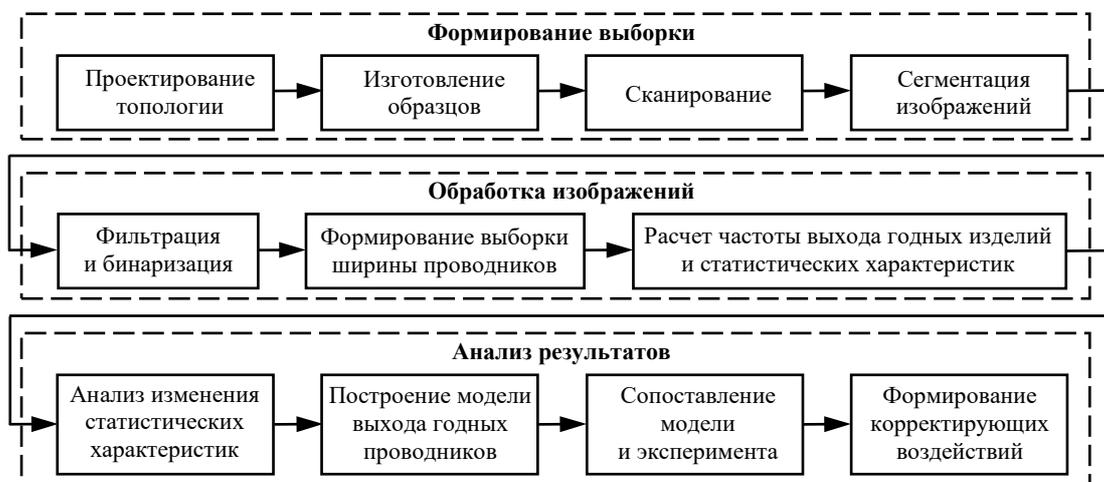


Рис. 5. Методика проведения эксперимента

Fig. 5. Experimental design

пьютерными методами определены распределения ширины проводника, проверено соответствие распределения нормальному, рассчитаны частоты выхода годных участков проводников и статистические характеристики: выборочное среднее и среднеквадратичное отклонение.

3. Анализ результатов. На этапе исследования изменение статистических характеристик для всего набора данных и зависимостей параметров  $\delta_{\text{exp}}$  и  $\xi$  от направления печати и проектируемой ширины проводника, построены модели вероятности выхода годных проводников и проведено сравнение результатов моделирования с частотами, полученными экспериментально, а также определены возможности для улучшения процесса.

*Формирование выборки.* Задачей первого этапа являлось формирование выборки изображений проводников, пригодных для дальнейшего анализа изменения параметров топологии в процессе изготовления, а также производственных погрешностей. Этап состоял из трех операций: проектирования тестовой топологии, изготовления образцов и их оцифровки.

В эксперименте использована топология  $225 \times 175$  мм, состоящая из отдельных прямоугольных областей шириной  $w_s = 21$  мм и высотой  $h_s = 17$  мм, внутри каждой из которых вертикально, горизонтально или диагонально расположены проводники одинаковой ширины  $w_d$ . Зазор между проводниками внутри области также одинаков и равен  $w_d$ . Параметр ширины проводника и зазора  $w_d$  варьируется между областями от 100 до 1500 мкм с увеличением размера шага по мере роста параметра  $w_d$  от 25 до 500 мкм.

Затем напечатаны негативные фотошаблоны на пленке для монохромной лазерной печати Kimoto A4 ОНР/DTP Kimolec PF-90S с помощью принтера HP LaserJet Pro 400 M401dn (разрешение печати 1200 dpi). Фотошаблоны обработаны спреем Kruse Density Toner для увеличения оптической плотности тонера.

Для создания заготовок использован двусторонний фольгированный стеклотекстолит (FR-4, толщина ламината 1.5 мм, толщина слоев фольги 18 мкм). Процесс изготовления образцов включает в себя механическую дезоксидацию

поверхностей заготовки; предварительный нагрев до 70 °С; нанесение негативного сухого пленочного фоторезиста (толщина 40 мкм) при температуре 105 °С; контактное экспонирование (время экспонирования составляет 21 с и определено клином Штоуффера [15, 16], ступень 9); проявку в 1 %-м водном растворе кальцинированной соды при температуре 29 °С в течение 1 мин. Для эксперимента изготовлено 3 фотошаблона и 3 соответствующих им заготовки.

Полутонные изображения образцов получены с помощью сканера CanoScan LiDE 400 (разрешение 4800 dpi, формат TIFF, 8 бит на пиксел), поскольку анализ изображений как метод исследования более предпочтителен по сравнению с проведением ручных измерений объектом-микрометром и позволяет многократно увеличить количество измерений, исключив при этом человеческий фактор.

Для обеспечения потоковой автоматической обработки на всех полученных изображениях определены участки с проводниками одинаковой ширины; изображения повернуты на угол, обеспечивающий вертикальное положение проводников; затем полученные участки разбиты на отдельные изображения равного размера, которые отсортированы в соответствии с типом образца (фотошаблон или заготовка после проявки), направлением печати проводников на фотошаблоне (вертикальное, горизонтальное или диагональное), номером образца, из которого получено изображение, и проектируемой шириной проводника.

В результате выполнения описанных операций сформирована выборка отсортированных и размеченных изображений проводников на фотошаблонах и заготовках.

*Обработка изображений.* Второй этап эксперимента предусматривал автоматическую компьютерную обработку изображений, позволяющую сформировать для каждого из них выборку ширины проводника, основные статистические характеристики (выборочное среднее и среднеквадратичное отклонение), а также значения частот выхода годных участков проводника, соответствующих требованиям стандартов по классам надежности.

Сначала проведена предварительная обработка изображения: наложение фильтра Гаусса (размер ядра  $9 \times 9$  пикселей); пороговая бинаризация для сегментации изображений на участки

с проводниками и зазорами; устранение шумов малого размера последовательным применением морфологических операторов открытия и закрытия (структурирующий элемент – квадрат размером  $5 \times 5$  пикселей) и медианного фильтра со структурирующим элементом тех же размеров. Основная сложность предварительной обработки заключалась в проведении корректной бинаризации изображений, которая осложнялась несколькими факторами:

1) к обработке предъявлялась выборка изображений различной природы (фотошаблоны и за-

готовки после экспонирования), которые должны иметь разные пороги бинаризации ( $b_n$ );

2) на изображениях фотошаблонов граница проводника имеет плавный переход, что влечет за собой существенное смещение края проводника при изменении порога бинаризации и, следовательно, неопределенность значения порога бинаризации, соответствующего реальной границе экспонирования (рис. 6, а);

3) на изображениях фотошаблонов с увеличением ширины проводников наблюдается связанное с большим светопропусканием измене-

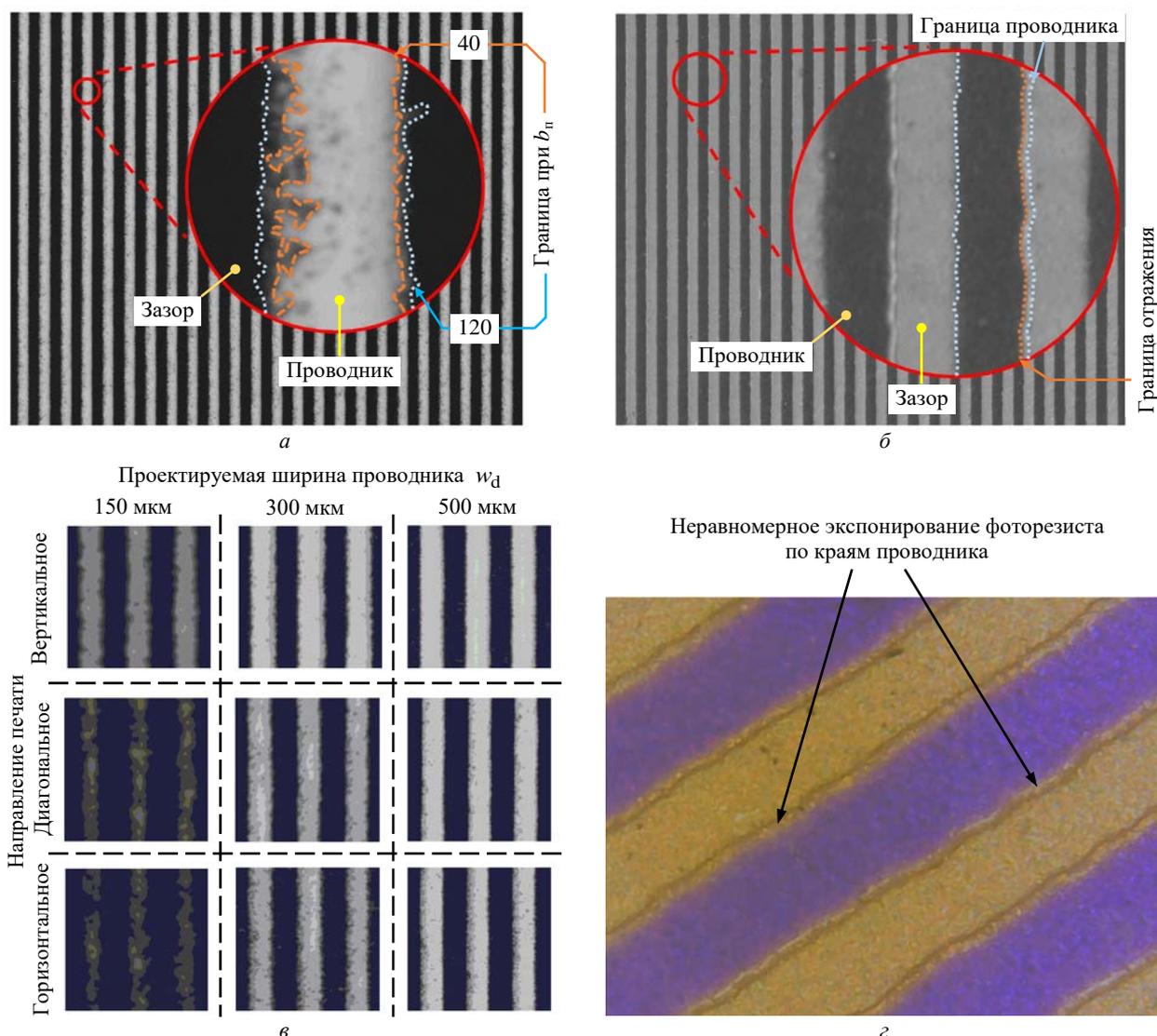


Рис. 6. Обработываемые изображения: а – изменение границ проводника на изображении фотошаблона при разных порогах бинаризации; б – смещение границы проводника на изображении заготовки после экспонирования, обусловленное отражением света; в – изменение качества проводников на фотошаблоне в зависимости от направления печати и проектируемой ширины проводника; z – неравномерное экспонирование фоторезиста (фото с микроскопа)

Fig. 6. Processed images: а – change in the boundaries of the conductor on the photomask image at different thresholds of binarization; б – displacement of the boundary of the conductor on the blank image due to the reflection of light; в – change in the quality of conductors on the photomask depending on the printing direction and the projected width of the conductor; z – uneven exposure of the photoresist (photo from the microscope)

ние уровня яркости на прозрачных участках, что также влияет на определение положения границы между проводником и зазором (рис. 6, в);

4) наличие плавного перехода на фотошаблонах является причиной неравномерной проявки фоторезиста, из-за чего фоторезист, накрывающий края проводников на заготовках, обесцвечивается и формирует отражения света, которые не позволяют корректно определить край проводника (рис. 6, г). На рис. 6, б приведен пример обрабатываемого изображения заготовки после проявки, на котором средний тон пикселей в диапазоне 0...255 (0 – черный, 255 – белый) в области проводников составляет 75, в области зазоров – 145, а в области отражения – 160, что выше порога бинаризации и соответствует области зазоров, а не проводников.

С учетом этих искажений корректная бинаризация всей выборки изображений фотошаблонов с помощью одного порога невозможна. С другой стороны, в силу однородности изображений нет необходимости в использовании локальных алгоритмов бинаризации. В результате для бинаризации выбран алгоритм глобальной бинаризации Оцу [17–19], который подразумевает разделение пикселей на два класса и использует в качестве параметра оптимизации для поиска порога минимум внутрикласовой дисперсии. Используемый в алгоритме критерий оптимизации позволяет получить значение порога для каждого изображения в зависимости от его гистограммы. С учетом того, что на фотошаблоне проводники имеют большую яркость относительно зазоров, а на заготовках – наоборот, для дальнейшего анализа выполнена инверсия яркости на бинаризованном изображении фотошаблона.

Для бинаризации изображений фотошаблонов также использован алгоритм Оцу. Компенсация некорректного распознавания, обусловленного отражением света от края фоторезиста, реализована с помощью добавления постоянного смещения, так как отражение не изменяет форму края проводника (рис. 6, б). Значение смещения для каждого изображения определено эмпирически на основе наложения бинаризованного изображения на исходное, а также контрольными измерениями с помощью объект-микрометра.

На рассматриваемом этапе из выборки исключены изображения шаблонов и заготовок

с горизонтальным и диагональным расположением проводников со значением проектируемой ширины проводника менее 150 мкм. При бинаризации изображений указанных шаблонов выявлено, что различия между тонами зазора и проводника незначительны и находятся на уровне разброса, что не позволяет выполнить бинаризацию корректно. Необходимо отметить, что недостаточная контрастность фотошаблона является причиной полного снятия фоторезиста на соответствующих образцах заготовок в процессе проявки.

На следующем этапе компьютерной обработки сформированы выборки значений ширины проводников для каждого изображения путем построчного прохода, что возможно благодаря расположению проводников на всех изображениях вертикально. Тогда ширина одного проводника – это количество идущих подряд в горизонтальном направлении черных пикселей на бинаризованном изображении. Для устранения ложных срабатываний, обусловленных имеющимися на анализируемых образцах дефектами, а также цифровым шумом сканера, из результирующей выборки исключены значения, отличающиеся от проектируемого значения более чем на 70 %, а также объединены изображения проводников в случае, если расстояние между ними менее 25 мкм. Затем для каждого значения ширины определено его соответствие классу надежности, отображенное на изображении (рис. 7, а): зеленым цветом показаны участки проводников, соответствующие классу 3 (наиболее жесткие требования, изменение ширины относительно проектируемого значения не превышает 20 %), желтым цветом – участки проводников, соответствующие классу 1 (нижняя граница годности, отклонения не более чем на 30 %), красным – дефектные участки, белым – ложные срабатывания. На основе полученной выборки определены частоты получения годных проводников для каждого класса надежности, т. е. экспериментально получены статистические аналоги вероятности.

Поскольку все обрабатываемые изображения представляют прямоугольные области одинакового размера (ширина  $w_s = 21$  мм, высота  $h_s = 17$  мм), объем полученных выборок значений ширины  $n$  уменьшается с увеличением параметра  $w_d$  и приближенно может быть описан выражением

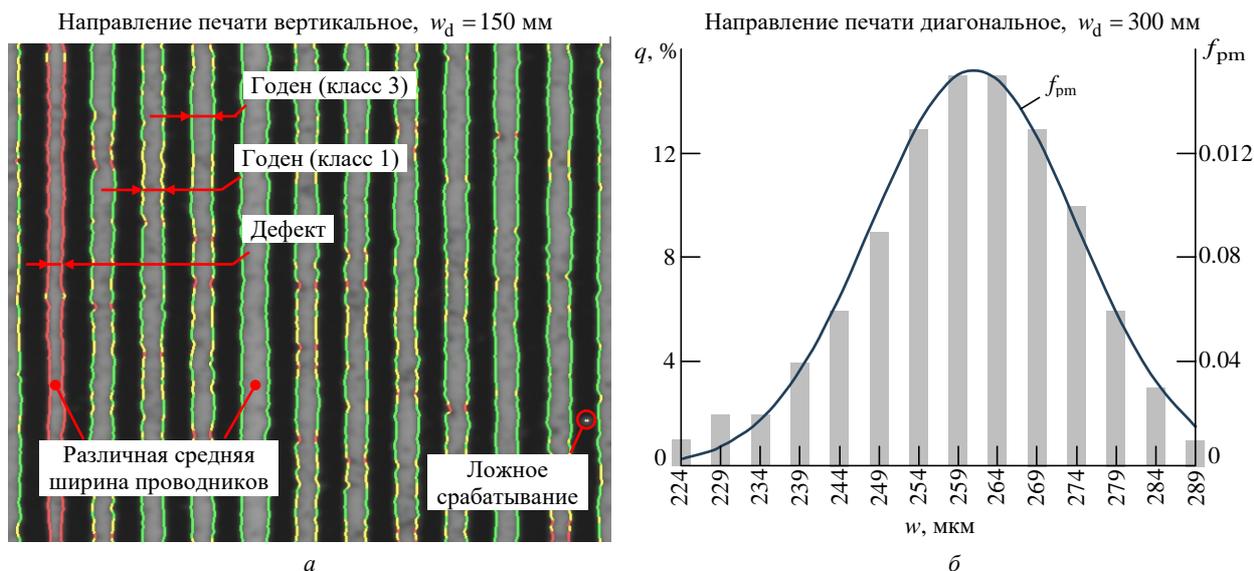


Рис. 7. Результаты обработки изображений фотошаблонов: а – цветовая маркировка распознанных значений ширины; б – сопоставление гистограммы частот  $q$  и функции плотности распределения  $f_{pm}(w)$  для одного из изображений

Fig. 7. Results of photomask image processing: а – color coding of recognized widths; б – comparison of frequency histogram  $q$  and probability density function  $f_{pm}(w)$  for one of the images

$$n \approx \text{floor} \left( \frac{w_s - w_d}{2w_d} \right) h_s \frac{r_{scan}}{k_{inch}}, \quad (3)$$

где  $\text{floor}(\cdot)$  – функция округления до целого в меньшую сторону;  $r_{scan} = 4800 \text{ dpi}$  – разрешение сканера;  $k_{inch} = 25.4$  – коэффициент преобразования из дюймов в миллиметры.

Выражение (3) состоит из двух сомножителей: первый описывает количество проводников на изображении по горизонтали, округленное до целого в меньшую сторону, а второй – количество пикселей в изображении по вертикали и, соответственно, количество измерений для одного проводника. Тогда предполагаемый размер выборки для изображений с минимально рассматриваемой шириной проводника 100 мкм должен составлять около 334 тыс., а для 1500 мкм – около 19 тыс.

В заключение компьютерной обработки изображения на основе выборки значений ширины построена гистограмма  $q$  частоты (отношения количества попадающих в интервал измерений к общему количеству измерений, выраженного в процентах) одного из обрабатываемых изображений фотошаблона. Гистограмма сопоставлена с функцией плотности нормального распределения  $f_{pm}(w)$ , параметры которого

получены методом моментов (рис. 7, б). Поскольку размеры обрабатываемых выборок велики, применение непосредственно к ним статистических критериев согласия приводит к появлению ложноотрицательных результатов, обусловленных увеличенными требованиями к отклонениям [20]. Поэтому для определения соответствия экспериментальных данных нормальному закону распределения использовалась визуальная оценка гистограмм, проверка статистическими критериями Колмогорова–Смирнова и Д’Агостино выборок, уменьшенных случайным образом до 1000 элементов. По результатам проведенной проверки в 30 % случаев нет оснований полагать, что выборки не соответствуют нормальному распределению с уровнем значимости 1 %.

Анализ оставшейся части выборки позволил выявить три основные причины отличия распределения от нормального:

1) на изображениях с проводниками высокого класса точности (100, 125 мкм) с горизонтальным и диагональным направлением печати отсутствуют элементы проводящего рисунка, поэтому они исключены из дальнейшего рассмотрения;

2) ошибки, обусловленные растеризацией изображения топологии принтером при печати: на гистограммах присутствуют пики, расстояние между которыми соответствует размеру

одного пиксела, который при используемом разрешении печати 1200 dpi составляет 21 мкм. Этот эффект также отчетливо виден на изображениях фотошаблонов с вертикальным направлением печати линий (рис. 7, а), на которых среднее значение ширины изменяется от проводника к проводнику;

3) ошибки оцифровки, выражающиеся в наличии пустых интервалов на гистограмме.

На рис. 8 приведена гистограмма усредненных частот значений ширины, полученная на основе обработки изображений трех образцов фотошаблонов с вертикальным расположением проводников шириной 175 мкм, на которых отчетливо видно бимодальное распределение  $N_{pm_1}$ , состоящее из двух близких к нормальным распределений

$$N_{pm_{11}} \in N(m_{11} = 154, \sigma_{11}^2 = 100),$$

$$N_{pm_{12}} \in N(m_{12} = 177, \sigma_{12}^2 = 100)$$

с вероятностью появления первого 2 к 1. Законы распределений имеют функции плотности  $f_{pm_1}(w)$ ,  $f_{pm_{11}}(w)$  и  $f_{pm_{12}}(w)$  соответственно.

Поскольку ошибки растреризации – результат математического округления, который нельзя

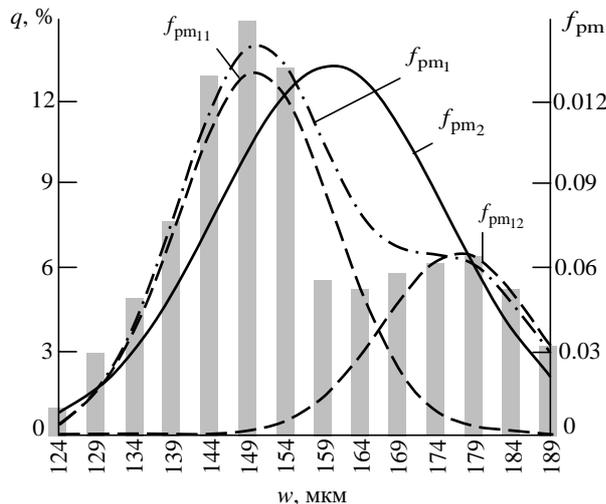


Рис. 8. Аппроксимация бимодального распределения ширины проводника на фотошаблоне нормальным унимодальным распределением (вертикальное направление печати,  $w_d = 175$  мкм)

Fig. 8. Approximation of the bimodal distribution of conductor width on the photomask caused by rasterization errors, by a normal unimodal distribution (vertical printing direction,  $w_d = 175$   $\mu$ m)

считать случайным, граница проводника на фотошаблоне может сдвигаться от проектируемого значения на один пиксел, что определяет наилучшие результаты печати в пределах  $\pm 2$  пикселей (или  $\pm 40$  мкм для используемого принтера с разрешением 1200 dpi). Чтобы снизить зависимость результатов от растреризации, в качестве исследуемых параметров выбирают выборочное среднее и среднееквадратичное отклонение, тем самым введя аппроксимацию распределения ширины проводников нормальным законом с большим параметром дисперсии. На рис. 8 аппроксимирующее распределение имеет параметры  $N_2 \in N(m_2 = 160, \sigma_2^2 = 225)$  и описывается функцией плотности  $f_{pm_2}(w)$ .

**Результаты.** На завершающем этапе эксперимента проведены:

- анализ изменения статистических характеристик в зависимости от направления печати и проектируемой ширины проводника;
- оценка возможности формирования на основе математических моделей, описывающих изменение характеристик;
- сформированы рекомендации по изменению топологии для компенсации изменения ширины проводника и проведена проверка их эффективности.

Сначала значения выборочных средних и среднееквадратичных отклонений, полученных от различных заготовок, усреднены, а также построены зависимости  $\delta_{pm}(w_d)$ , описывающие разницу между выборочным средним и проектируемым значением в зависимости от последнего (рис. 9, а) для результатов с фотошаблонов при различном направлении проводников. На полученном графике выделены следующие особенности:

- 1) зависимости для всех направлений имеют схожую форму, однако разное вертикальное смещение;
- 2) с увеличением проектируемой ширины наблюдается плавное уменьшение по модулю  $\delta_{pm}$  до значения ширины около 400 мкм с выходом на плато, на котором вертикальные проводники имеют наименьшее отличие от проектируемого значения, диагональные – уже на 30 мкм, горизонтальные – уже на 40 мкм.

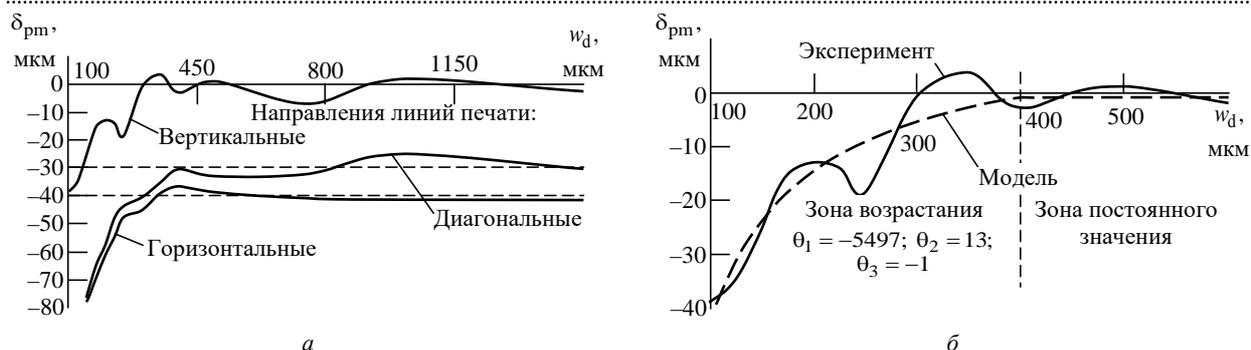


Рис. 9. Разница между шириной проводника на фотошаблоне и проектируемым значением  $w_d$ :  
а – сравнение результатов при разном направлении печати; б – пример математической модели  $\delta_{pm}(w)$   
для вертикального направления печати проводников

Fig. 9. Difference between the manufactured conductor width on the photomask and its designed value  $w_d$ :  
а – comparing results under different printing directions; б – example of a model  $\delta_{pm}(w)$   
for vertical printing direction of the conductor

Таким образом, принтер обеспечивает разное качество воспроизведения проводников. Наибольшее соответствие наблюдается при печати вертикальных линий, для остальных ориентаций печатает проводники уже относительно проектируемых значений, так как параметр  $\delta_{pm}$  меньше нуля.

Аналогичным образом исследовано поведение выборочного среднеквадратичного отклонения ширины проводника ( $\sigma_{pm}$ ), которое остается постоянным при изменении ширины проводника, а при изменении направления печати меняется мало: для вертикальных проводников 14 мкм, для диагональных – 18 мкм, для горизонтальных – 23 мкм.

По полученным экспериментальным данным построены модели изменения ширины проводника на фотошаблоне  $\delta_{pm}(w_d)$  для каждого направления печати:

$$\delta_{pm}(w_d) = \begin{cases} (\theta_1/w_d) + \theta_2, & w_d \leq 400 \text{ мкм}; \\ \theta_3, & w_d > 400 \text{ мкм}. \end{cases}$$

Модели имеют кусочный вид (рис. 9, б): на участке роста (до 400 мкм) функция описана гиперболой с параметрами  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ , на плато – постоянным значением  $\theta_3$ . Значения параметров моделей  $\theta_1 \dots \theta_3$  определены методом наименьших квадратов: для вертикальных проводников  $\theta_1 = -5497$ ,  $\theta_2 = 13$ ,  $\theta_3 = -1$ ; для диагональных –  $\theta_1 = -9957$ ,  $\theta_2 = -7$ ,  $\theta_3 = -33$ ; для горизонтальных –  $\theta_1 = -9341$ ,  $\theta_2 = -14$ ,  $\theta_3 = -38$ . Ко-

эффициенты детерминации  $R^2$  полученных моделей составляют 0,9, 0,97 и 0,95 соответственно.

Аналогичным образом проанализированы зависимости разницы между выборочным средним  $\delta_{pm}$  и проектируемым значением для заготовки после экспонирования  $\delta_{exp}$  (рис. 10) и проведен сравнительный анализ с результатами, полученными для фотошаблона, а также с результатами измерений ширины проводников объект-микрометром. По полученным зависимостям сделаны выводы о том, что характер изменения параметров  $\delta_{pm}$  и  $\delta_{exp}$  совпадает,

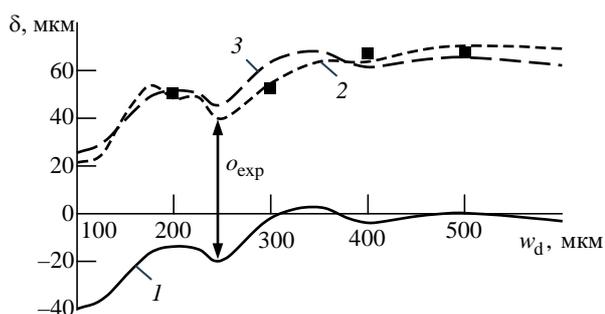


Рис. 10. Сравнение параметра искажения проводящего рисунка на фотошаблоне  $\delta_{pm}$  (1) и образце после экспонирования  $\delta_{exp}$  (2); 3 – зависимость параметра искажения на фотошаблоне (1), смещенная на  $\sigma_{exp} \approx 65$  мкм; ■ – результаты измерения заготовки объект-микрометром

Fig. 10. Comparison of the conductive pattern distortion parameter on the photomask  $\delta_{pm}$  (1) and the specimen after exposure  $\delta_{exp}$  (2); 3 – dependence of the distortion parameter on the photomask (1), shifted by  $\sigma_{exp} \approx 65$   $\mu\text{m}$ ; ■ – results of measuring the workpiece with an object-micrometer

однако величина  $\delta_{\text{exp}}$  имеет постоянное смещение ( $\sigma_{\text{exp}}$ ) около 65 мкм. Таким образом, в процессе экспонирования происходит увеличение ширины проводника, что можно связать с наличием паразитной засветки под маскированными участками фотошаблона по краям проводника. Это увеличение примерно равно удвоенной толщине фоторезиста 80 мкм. Также подтверждена согласованность измерений с результатами, полученными с помощью объект-микроскопа. Изменения среднеквадратичного отклонения ширины проводника на заготовках после экспонирования ( $\sigma_{\text{exp}}$ ) относительно результатов, полученных с фотошаблонов ( $\sigma_{\text{pm}}$ ), незначительны, а потому в качестве оценки  $\sigma_{\text{exp}}$  использовано среднее, рассчитанное по всем значениям, составившее 18 мкм.

Тогда математическая модель, связывающая среднее значение ширины изготовленного проводника ( $w_{\text{exp}}$ ) и спроектированного ( $w_d$ ) описывается формулой

$$w_{\text{exp}}(w_d) = w_d + \delta_{\text{exp}}(w_d) = w_d + \delta_{\text{pm}}(w_d) + \sigma_{\text{exp}}$$

В предположении, что ширина изготовленного проводника ( $w_{\text{exp}}$ ) как случайная величина подчинена нормальному закону распределения с математическим ожиданием  $w_{\text{exp}}(w_d)$  и среднеквадратичным отклонением  $\sigma_{\text{exp}}$ , определена вероятность выхода годной заготовки после экспонирования ( $P_{\text{exp}}$ ) как вероятность попадания ширины изготовленного проводника в поле допуска  $\pm 20\%$  для удовлетворения требований класса надежности 3, а также допуска  $\pm 30\%$  для класса надежности 1. Затем выполнено наложение результатов моделирования вероятности  $P_{\text{exp}}$  и экспериментально полученных нормализованных значений частот выхода годных проводников, полученных на этапе компьютерной обработки (рис. 11). Результаты наложения подтверждают согласованность модели и экспериментальных данных.

Выполнен сравнительный анализ результатов воспроизведения проводников разных направлений печати линий. В качестве количественного

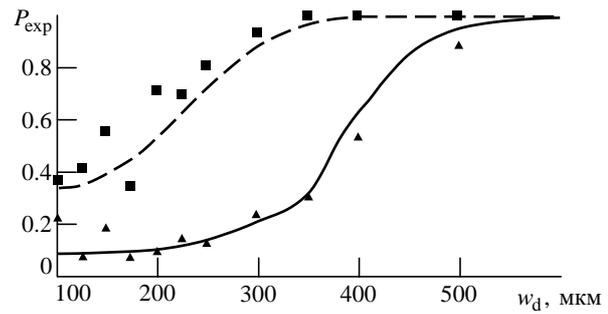


Рис. 11. Вероятность выхода бездефектной заготовки проводника проектируемой ширины  $w_d$ . Направление печати проводников – вертикальное. Кривые – результаты моделирования, маркеры – результаты эксперимента. Сплошная кривая, треугольные маркеры – класс надежности 3; штриховая кривая, квадратные маркеры – класс надежности 1

Fig. 11. Yield probability of a defect-free conductor blank of the designed width  $w_d$ . Direction of conductor printing is vertical. Solid curve, triangular markers – reliability class 3; dashed curve, square markers – reliability class 1

критерия сравнения использована проектируемая ширина проводника, для которой вероятность изготовления в соответствии с требованиями стандартов составляет 0.97 (рис. 12). Определено, что для вертикальных проводников (рис. 12, а), несмотря на минимальное расхождение между проектируемой и напечатанной шириной  $\delta_{\text{pm}}$ , паразитная засветка значительно увеличивает ширину изготовленного проводника, что в конечном итоге приводит к худшему результату по сравнению с остальными. Для горизонтальных и диагональных проводников (рис. 12, б, в) уменьшенная ширина проводников на фотошаблоне, наоборот, компенсируется увеличением ширины от паразитной засветки, что увеличивает диапазон возможных для изготовления значений ширины (таблица).

Таким образом, для исследуемой лабораторной линии получения печатных плат низкие па-

Минимальная воспроизводимая проектируемая ширина проводника  $w_d$ , на которой обеспечивается вероятность изготовления в соответствии с требованиями приемки 0.97 на исследуемой технологической линии

The minimum reproducible designed width of the conductor  $w_d$ , which ensures the yield probability in accordance with the acceptance criteria of 0.97 for the investigated production line

Класс надежности	Направление печати проводников		
	Вертикальное	Диагональное	Горизонтальное
$w_d$ , мкм			
3	540	220	190
1	350	180	160

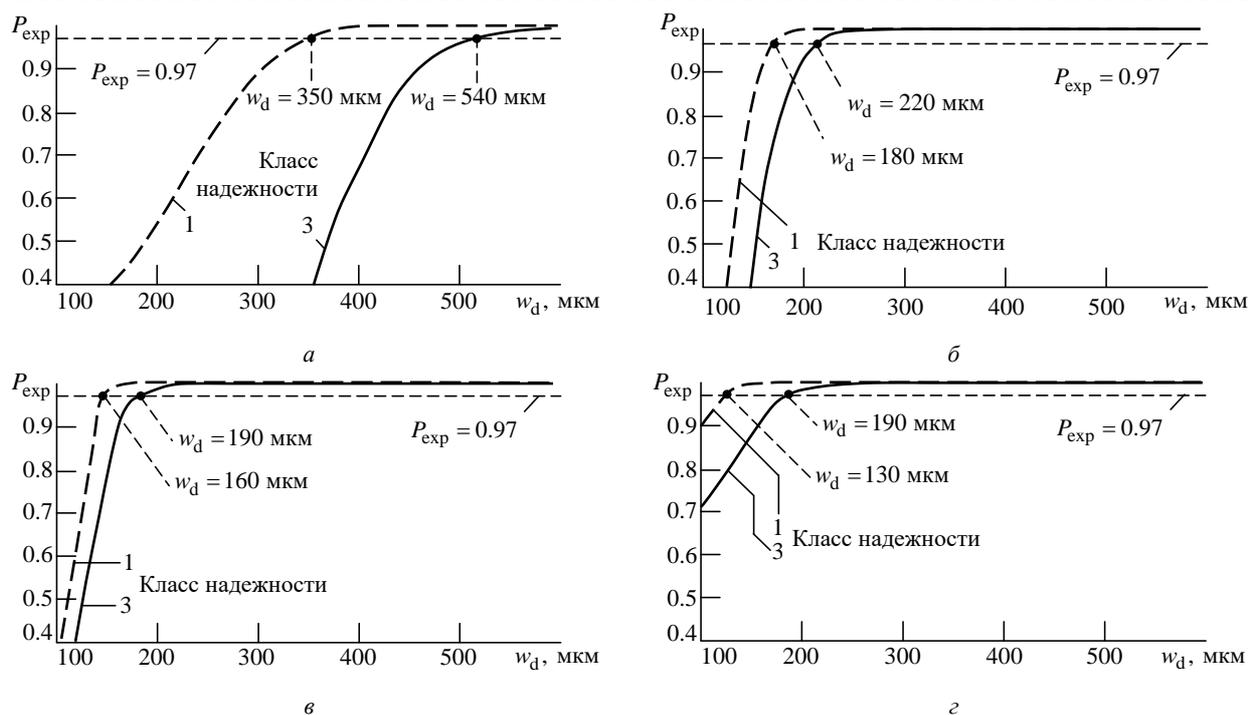


Рис. 12. Вероятность выхода бездефектной заготовки для различных направлений печати проводников: а – вертикальное; б – диагональное; в – горизонтальное; г – все направления с учетом компенсации

Fig. 12. Yield probability of defect-free PCB blanks for different directions of conductor printing: а – vertical; б – diagonal; в – horizontal; г – all directions with compensation

параметры точности воспроизведения проводящего рисунка в большей степени обусловлены изменением математического ожидания ширины проводника в процессе изготовления, а не неровностью воспроизведения краев проводника, описываемого среднеквадратичным отклонением. Считая математическое ожидание ширины проводника неслучайной величиной, можно компенсировать его изменение в ходе технологического процесса некоторой величиной  $c(w_d)$ , тем самым увеличив вероятность выхода бездефектной заготовки. В качестве критерия оптимизации использовано равенство проектируемого значения ширины проводника и результата его изготовления, величина  $c(w_d)$  совпадает по значению с  $\delta_{\text{exp}}(w_d)$ , но имеет обратный знак:  $c(w_d) = -\delta_{\text{exp}}(w_d)$ .

Для проверки эффективности компенсации проведен повторный эксперимент, в котором введено изменение ширины проводников с использованием параметра  $c(w_d)$ . Эффективность компенсации подтверждается совпадением частот годных участков для разных направлений печати и уменьшением значения минимальной проектируемой ширины проводника. Вероятностный подход к оценке качества проведения операции фотолитографии при производстве печатных плат

емой ширины проводника, на которой достигается приемлемый уровень вероятности. С учетом компенсации закон распределения ширины имеет параметры  $W_{\text{exp}} \in N(w_d, 324)$ , а минимальная воспроизводимая ширина проводника при значении вероятности 0.97 составляет 190 мкм для класса надежности 3 и 130 мкм – для класса надежности 1 (рис. 12, г).

**Заключение.** Разработана математическая модель оценки качества изготовления заготовок печатных плат после фотолитографии на основе расчета вероятности выхода заготовок, соответствующих требованиям приемки. Модель позволяет учитывать как параметры конструкции печатной платы, так и характеристики технологического процесса их изготовления.

Разработана методика экспериментальной проверки адекватности модели на основе компьютерного анализа изображений тестовых образцов, которая может быть использована самостоятельно для определения статистических характеристик качества фотолитографии. Проведенный эксперимент показал согласованность полученных результатов моделирования и опытных данных, а также позволил определить количественные значения искажений раз-

меров проводящего рисунка и неровности воспроизведения края проводника.

На основании выполненного эксперимента проведена компенсация неслучайной составляющей искажения размеров топологии, вызванной паразитной засветкой в процессе экспонирования и изменением рисунка при печати, в результате чего достигнуто воспроизведение топологии четвертого класса точности по ГОСТ Р 53429–2009 (ширина проводника и зазора равны 150 мкм) согласно классу надежности I по IPC-A-600G.

Проведенный эксперимент имеет следующие ограничения:

1. Локальность применения полученных зависимостей (изменения ширины проводника при изготовлении фотошаблонов и заготовок, а также вероятности получения бездефектной заготовки в соответствии с требованиями) для исследуемого лабораторного процесса. Несмотря на это, предложенная методика проведения эксперимента может быть применена и для промышленных процессов.

2. Разработанная модель не описывает весь процесс воспроизведения проводящего рисунка полностью. В частности, требуется добавление учета процесса травления, который также будет влиять на изменение размеров топологии за счет бокового подтравливания. Однако модель может быть расширена на основании проведения исследования по методике, аналогичной представленной в настоящей статье.

Результаты расчета вероятности могут служить индикатором необходимости внесения изменений в конструкцию печатного узла. Для предприятия-изготовителя эти результаты могут служить элементом оценки рисков и размера резервов, требуемых для производства образцов высокой сложности. Также возможно решение обратной задачи: определение требуемых параметров конструкции в зависимости от технологических возможностей или формирование универсального инструментария оценки качества трассировки печатных плат.

### Список литературы

1. Influence of Nonfunctional Contact Pads on Printed-Circuit Performance / S. V. Vantsov, F. V. Vasil'ev, A. M. Medvedev, O. V. Khomutskaya // Russian Engineering Research. 2020. Vol. 40, iss. 5. P. 442–445. doi: 10.3103/S1068798X20050202

2. Ванцов С., Хомутская О., Лийн Е. Влияние конструктивных параметров на плоскую деформацию печатных плат // Электроника: наука, технология, бизнес. 2023. № 8 (229). С. 108–112. doi: 10.22184/1992-4178.2023.229.8.108.112

3. Potentials for Improvement of Resource Efficiency in Printed Circuit Board Manufacturing: A Case Study Based on Material Flow Cost Accounting / Y.-X. Wang, C.-H. Kuo, R. Song, A. H. Hu, S.-S. Zhang // Sustainability. 2017. Vol. 9, № 6. Art. № 907. 16 p. doi: 10.3390/su9060907

4. Ванцов С. В., Хомутская О. В., Лийн Е. А. Новые возможности автоматизации технологических процессов в приборостроении // Вестн. МГТУ "Станкин". 2023. № 3 (66). С. 129–136. doi: 10.47617/2072-3172\_2023\_3\_129

5. Investigating the Solder Mask Defects Impact on Leakage Current on PCB under Condensing Humidity Conditions / Z. Kaichen, S.-B. Amir, I. Francesco, R.-C. Amol, H. Jørgen, M.-R. Jyothsna, B. Sajjad, A. Rajan // Microelectronics Reliability. 2023. Vol. 150, iss. 4. Art. № 115210. doi: 10.1016/J.Microrel.2023.115210

6. Cherkasov K. V., Meshkov S. A., Makeev M. O. Estimation of Influence of Technological Factors on Technological Variation of Assignment Indicators of

Frequency Mixers with Resonant-Tunnel Diodes as Nonlinear Elements // Intern. Conf. on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). Sochi, 20–24 May, 2024. P. 1077–1082. doi: 10.1109/ICIEAM60818.2024.10553749

7. Reliability Prediction of AlGaAs Resonant-Tunneling Diodes and Nonlinear Converters of Microwave Radio Signals Based on Them / S. A. Kozubnyak, S. A. Meshkov, O. S. Naraikin, E. N. Soboleva, V. D. Shashurin // Nanotechnologies in Russia. 2017. Vol. 12, № 7–8. P. 360–368. doi: 10.1134/S1995078017040127

8. Niknafs H., Faridkhan M., Kazemi C. Analytical Approach to Product Reliability Estimation Based on Life Test Data for an Automotive Clutch System // Mechanics and Mechanical Engineering. 2018. Vol. 22, № 4. P. 845–863. doi: 10.2478/mme-2018-0065

9. Engineering and Analytical Method for Estimating the Parametric Reliability of Products by a Low Number of Tests / A. G. Amosov, V. A. Golikov, M. V. Kapitonov, F. V. Vasilyev, O. K. Rozhdestvensky // Inventions. 2022. Vol. 7, № 1. Art. № 24. doi: 10.3390/inventions7010024

10. Data-driven simulation-based decision support system for resource allocation in industry 4.0 and smart manufacturing / M. Ehsan, F. Masood, T. Madjid, G. Morteza, H. C. Ng. Amos // J. of Manufacturing Systems. 2024. Vol. 72. P. 287–307. doi: 10.1016/j.jmsy.2023.11.019

11. IPC-6012B. Qualification and Performance Specification for Rigid Printed Boards. IPC Intern. Bannockburn, Ill., 2007. 56 p.
12. IPC-A-600G; Acceptability of Printed Boards. IPC Intern. Bannockburn, Ill., 2004, 140 p.
13. Korobkov M. A., Vasilyev F. V., Khomutskaya O. V. Analytical Model for Evaluating the Reliability of Vias and Plated Through-Hole Pads on PCBs // *Inventions*. 2023. Vol. 8, № 3. Art. № 77. doi: 10.3390/inventions8030077
14. The Method of Automated Evaluation of the Deformation of the Printed Circuit Board / O. V. Khomutskaya, A. M. Medvedev, M. A. Korobkov, S. V. Vantsov // 2021 Intern. Conf. on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS). Ufa, 27–29 Oct. 2021. Ufa State Aviation Technical University. P. 510–512. doi: 10.1109/ICOECS52783.2021.9657420
15. Printed Circuits Handbook. Ed. by C. F. Coombs Jr. 6<sup>th</sup> Ed. New York: McGraw-Hill, 2008. 1633 p. doi: 10.1036/0071467343
16. Transmission Step Wedges. URL: <https://www.stouffer.net/TransPage.htm> (дата обращения 14.11.2024).
17. Исрафилов Х. С. Исследование методов бинаризации изображений // *Вестн. науки и образования*. 2017. Т. 2, № 6 (30). С. 43–50.
18. Исследование алгоритмов предобработки изображений для повышения эффективности распознавания медицинских снимков / П. А. Шагалова, А. Д. Ерофеева, М. М. Орлова, Ю. С. Чистякова, Э. С. Соколова // *Тр. НГТУ им. П. Е. Алексеева*. 2020. № 1 (128). С. 25–32.
19. Казбеков А. В., Максимов Н. А. Методы сравнения контуров в задачах распознавания образов // *Науч. вестн. Моск. гос. техн. ун-та гражданской авиации*. 2012. № 185. С. 37–42.
20. Drezner Z., Turel O., Zerom D. A Modified Kolmogorov-Smirnov Test for Normality // *Communications in Statistics – Simulation and Computation*. 2008. Vol. 39, iss. 4. P. 693–704. doi: 10.1080/03610911003615816

### Информация об авторах

**Коробков Максим Андреевич** – магистр по направлению "Информатика и вычислительная техника" (2021, Московский авиационный институт), старший преподаватель и аспирант кафедры "Цифровые технологии и информационные системы" Московского авиационного института. Автор 29 научных работ. Сфера научных интересов: технологии проектирования, разработки и изготовления печатных узлов; методы оценки надежности электроники; информационные технологии в приборостроении; автоматизированные системы управления технологическими процессами; встраиваемые системы.

Адрес: Московский авиационный институт, Волоколамское шоссе, д. 4, Москва, 125993, Россия

E-mail: josef\_turok@bk.ru

<https://orcid.org/0000-0001-7686-6300>

**Барабанов Василий Сергеевич** – бакалавр по направлению "Информационные системы и технологии" (2024, Московский авиационный институт). Автор четырех научных публикаций. Сфера научных интересов: встраиваемые системы на базе микроконтроллеров и ПЛИС; модели прогнозирования механических и электрических характеристик печатных плат; автоматизация и оптимизация процессов изготовления печатных плат; технологии изготовления электроники, автоматизированные системы управления; распознавание изображений.

Адрес: Московский авиационный институт, Волоколамское шоссе, д. 4, Москва, 125993, Россия

E-mail: BarabanovVas2002@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0005-8653-8702>

### References

1. Vantsov S. V., Vasil'ev F. V., Medvedev A. M., Khomutskaya O. V. Influence of Nonfunctional Contact Pads on Printed-Circuit Performance. *Russian Engineering Research*. 2020, vol. 40, iss. 5, pp. 442–445. doi: 10.3103/S1068798X20050202
2. Vantsov S., Khomutskaya O., Liin E. Influence of Design Parameters on Plane Deformation of Printed Circuit Boards. *Electronics: Science, Technology, Business*. 2023, no. 8 (229), pp. 108–113. (In Russ.) doi: 10.22184/1992-4178.2023.229.8.108.112
3. Wang Y.-X., Kuo C.-H., Song R., Hu A. H., Zhang S.-S. Potentials for Improvement of Resource Efficiency in Printed Circuit Board Manufacturing: A Case Study Based on Material Flow Cost Accounting. *Sustainability*. 2017, vol. 9, no. 6, art. no. 907, 16 p. doi: 10.3390/su9060907
4. Vantsov S. V., Khomutskaya O. V., Liin E. A. New Opportunities for Automation of Manufacturing Processes in Instrumentation. *Vestnik MSTU "Stankin"*. 2023, no. 3 (66), pp. 129–136. (In Russ.) doi: 10.47617/2072-3172\_2023\_3\_129
5. Kaichen Z., Amir S.-B., Francesco I., Amol R.-C., Jørgen H., Jyothsna M.-R., Sajjad B., Rajan A. Investigating the Solder Mask Defects Impact on Leakage Current on PCB under Condensing Humidity Conditions. *Microelectronics Reliability*. 2023, vol. 150, iss. 4, art. no. 115210. doi: 10.1016/J.Microrel.2023.115210
6. Cherkasov K. V., Meshkov S. A., Makeev M. O. Estimation of Influence of Technological Factors on Technological Variation of Assignment Indicators of Frequency Mixers with Resonant-Tunnel Diodes as Nonlinear Elements. *Intern. Conf. on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. Sochi, 20–24 May 2024, pp. 1077–1082. doi: 10.1109/ICIEAM60818.2024.10553749

7. Kozubnyak S. A., Meshkov S. A., Naraikin O. S., Soboleva E. N., Shashurin V. D. Reliability Prediction of AlGaAs Resonant-Tunneling Diodes and Nonlinear Converters of Microwave Radio Signals Based on Them. *Nanotechnologies in Russia*. 2017, vol. 12, no. 7–8, pp. 360–368.  
doi: 10.1134/S1995078017040127

8. Niknafs H., Faridkhah M., Kazemi C. Analytical Approach to Product Reliability Estimation Based on Life Test Data for an Automotive Clutch System. *Mechanics and Mechanical Engineering*. 2018, vol. 22, no. 4, pp. 845–863.  
doi: 10.2478/mme-2018-0065

9. Amosov A. G., Golikov V. A., Kapitonov M. V., Vasilyev F. V., Rozhdestvensky O. K. Engineering and Analytical Method for Estimating the Parametric Reliability of Products by a Low Number of Tests. *Inventions*. 2022, vol. 7, no. 1, art. no. 24.  
doi: 10.3390/inventions7010024

10. Ehsan M., Masood F., Madjid T., Morteza G., Amos H. C. Ng. Data-Driven Simulation-Based Decision Support System for Resource Allocation in Industry 4.0 and Smart Manufacturing. *J. of Manufacturing Systems*. 2024, vol. 72, pp. 287–307.  
doi: 10.1016/j.jmsy.2023. 11.019

11. IPC-6012B. Qualification and Performance Specification for Rigid Printed Boards. IPC Intern. Bannockburn, Ill., 2007, 56 p.

12. IPC-A-600G; Acceptability of Printed Boards. IPC Intern. Bannockburn, Ill., 2004, 140 p.

13. Korobkov M. A., Vasilyev F. V., Khomutskaya O. V. Analytical Model for Evaluating the Reliability of Vias

and Plated Through-Hole Pads on PCBs. *Inventions*. 2023, vol. 8, no. 3, art. no. 77.

doi: 10.3390/inventions8030077

14. Khomutskaya O. V., Medvedev A. M., Korobkov M. A., Vancov S. V. The Method of Automated Evaluation of the Deformation of the Printed Circuit Board. 2021 Intern. Conf. on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS). Ufa, 27–29 Oct. 2021. Ufa State Aviation Technical University. P. 510–512.  
doi: 10.1109/ICOECS52783.2021.9657420

15. Printed Circuits Handbook. Ed. by C. F. Coombs Jr. 6<sup>th</sup> Ed. New York, McGraw-Hill, 2008, 1633 p.  
doi: 10.1036/0071467343

16. Transmission Step Wedges. Available at: <https://www.stouffer.net/TransPage.htm> (accessed 14.11.2024)

17. Israfilov Kh. S. Study of Image Binarization Methods. *Vestnik nauki i obrazovaniya*. 2017, vol. 2, no. 6 (30), pp. 43–50. (In Russ.)

18. Shagalova P. A., Erofeeva A. D., Orlova M. M., Chistyakova Yu. S., Sokolova E. S. Research of Application of Imaging Preprocessing Algorithms for Improving Efficiency of Recognition of Medical Pictures. *Trudy NGTU im. R. E. Alekseeva*. 2020, no. 1 (128), pp. 25–32. (In Russ.)

19. Kazbekov A. V., Maksimov N. A. Methods for Comparing Contours In Pattern Recognition Problems. *Civil Aviation High Technologies*. 2012, no. 185, pp. 37–42. (In Russ.)

20. Drezner Z., Turel O., Zerom D. A Modified Kolmogorov-Smirnov Test for Normality. *Communications in Statistics – Simulation and Computation*. 2008, vol. 39, iss. 4, pp. 693–704.  
doi: 10.1080/03610911003615816

### Information about the authors

**Maksim A. Korobkov**, Master in Informatics and Computer Science (2021, Moscow Aviation Institute (National Research University)), Senior Lecturer and Postgraduate Student of the Department of Digital Technologies and Information Systems of Moscow Aviation Institute (National Research University). The author of 29 scientific publications. Area of expertise: technologies for design, development and manufacturing of printed circuit boards and assemblies; methods for assessing the reliability of electronics; information technologies in instrumentation; automated control systems for manufacturing processes; embedded systems.

Adress: Moscow Aviation Institute (National Research University), 4, Volokolamskoe highway, Moscow 125993, Russia  
E-mail: josef\_turok@bk.ru

<https://orcid.org/0000-0001-7686-6300>

**Vasily S. Barabanov**, Bachelor in Information Systems and Technologies (2024, Moscow Aviation Institute (National Research University)). The author of 4 scientific publications. Area of expertise: embedded systems and devices on the basis of MCU & FPGA; models for predicting mechanical and electrical PCB characteristics; automation and optimization PCB manufacturing processes; electronics manufacturing technologies; automated control systems; computer vision.

Adress: Moscow Aviation Institute (National Research University), 4, Volokolamskoe highway, Moscow 125993, Russia  
E-mail: BarabanovVas2002@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0005-8653-8702>

---