

УДК 621.389
DOI: 10.17586/0021-3454-2025-68-4-342-354

МЕТОД СОВМЕЩЕНИЯ ШАБЛОНА И ЗАГОТОВКИ ДЛЯ УСТАНОВКИ ПРЯМОГО ЭКСПОНИРОВАНИЯ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ НА ОСНОВЕ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ МАТРИЦЫ

М. А. Коробков*, А. С. Демидов, О. В. Хомутская

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

** josef_turok@bk.ru*

Аннотация. Представлен метод оптического совмещения шаблона и заготовки для установки прямого экспонирования печатных плат, использующей жидкокристаллическую матрицу, с целью формирования топологии на фоточувствительном материале. В частности, рассмотрены процессы калибровки положения видеокамеры относительно рабочего поля установки и позиционирования изображения с переносимой топологией — относительно положения заготовки. Для каждого процесса составлены алгоритмы реализации и выполнено экспериментальное тестирование, подтвердившее их работоспособность. Статистический анализ показал погрешность совмещения шаблона и заготовки ± 300 мкм. Разработанные алгоритмы и их программные реализации могут быть использованы в качестве методического и программного базиса при исследовании методов оценки и компенсации деформации печатных плат в процессе их производства.

Ключевые слова: производство печатных плат, деформация печатных плат, прямое экспонирование, цифровой фотошаблон, жидкокристаллическая матрица, надежность технологических процессов

Благодарности: работа поддержана грантом Российского научного фонда, грант № 23-29-10204.

Ссылка для цитирования: Коробков М. А., Демидов А. С., Хомутская О. В. Метод совмещения шаблона и заготовки для установки прямого экспонирования печатных плат на основе жидкокристаллической матрицы // Изв. вузов. Приборостроение. 2025. Т. 68, № 4. С. 342–354. DOI: 10.17586/0021-3454-2025-68-4-342-354.

METHOD OF PHOTOMASK AND BLANK ALIGNMENT FOR DIRECT EXPOSURE OF PCB BASED ON A LIQUID CRYSTAL MATRIX

M. A. Korobkov*, A. S. Demidov, O. V. Khomutskaya

Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

** josef_turok@bk.ru*

Abstract. A method of optical alignment of photomask and blank for installing direct exposure of PCB on a liquid crystal matrix to form a desired topology on the photosensitive material is presented. In particular, the processes of calibrating the video camera position relative to the working field of the installation and positioning the image with the transferred topology relative to the workpiece position are considered. Implementation algorithms are compiled for each process and experimental testing is performed to confirm their operability. Statistical analysis shows an error in alignment the photomask topology with the blank of ± 300 microns. The developed algorithms and corresponding software implementations can be used as a methodological and programmatic basis for a study of methods for evaluating and compensating for PCB deformation during its manufacture.

Keywords: production of printed circuit boards, deformation of printed circuit boards, direct exposure, digital photomask, liquid crystal display, reliability of PCB manufacturing processes

Acknowledgments: The work was supported by a grant from the Russian Science Foundation, grant No. 23-29-10204.

For citation: Korobkov M. A., Demidov A. S., Khomutskaya O. V. Method of photomask and blank alignment for direct exposure of PCB based on a liquid crystal matrix. *Journal of Instrument Engineering*. 2025. Vol. 68, N 4. P. 342–354 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2025-68-4-342-354.

Введение. Современные электронные изделия создаются на основе печатных плат (ПП), представляющих собой многослойную структуру, состоящую из диэлектрического основания и проводящего рисунка. Одно из главных требований, предъявляемых к современным электронным изделиям, — снижение массогабаритных показателей аппаратуры. С целью удовлетворения этому требованию многослойные печатные платы (МПП) постоянно усложняют, увеличивают плотность межслойных соединений. Повышение плотности соединений тесно связано с уменьшением размеров элементов проводящего рисунка, что приводит к нарушению пространственного совмещения контактных площадок переходных отверстий [1–3].

Рассовмещение вызывается деформацией базового композитного материала подложки в слое и погрешностями технологического характера. Связанные с деформацией дефекты [4–6] проявляются на конечных этапах технологического процесса и приводят к снижению выпуска годных изделий, поэтому необходима разработка методов, позволяющих компенсировать деформацию на этапах конструирования, технологической подготовки производства и самого производства.

Одним из возможных этапов для компенсации деформации ПП является операция экспонирования, в ходе которой проводящий рисунок переносится на заготовку с помощью фоточувствительного материала. Идея компенсации деформации на этапе экспонирования становится еще более привлекательной вследствие развития систем прямого экспонирования ПП, осуществляющих перенос топологии без использования фотошаблонов и имеющих возможность программного изменения геометрии воспроизводимой топологии на основе производственных файлов. Ввиду дороговизны и труднодоступности систем прямого экспонирования для исследования методов компенсации деформации ПП возможно использовать установку прямого экспонирования, которая формирует изображение на фоточувствительном материале путем селективного пропускания ультрафиолетового излучения через монохромную жидкокристаллическую (ЖК) матрицу [7, 8].

В проведенном ранее исследовании [9] определены возможности использования установки прямого экспонирования на основе ЖК-матрицы для задач компенсации деформации ПП, в частности:

1) представлен способ компенсации деформации, основанный на методе контроля совмещаемости топологических слоев [10], который предполагает определение матрицы перехода с помощью сопоставления эталона и изображения заготовки в процессе производства;

2) предложен алгоритм подготовки к работе установки прямого экспонирования на основе ЖК-матрицы, который включает в себя три основные операции: генерацию набора изображений для отображения на ЖК-матрице, калибровку положения видеокамеры, совмещение изображения проводящего рисунка и заготовки (см. рис. 8 в статье [9]);

3) выполнено дооснащение установки контуром обратной связи на основе видеокамеры, предоставляющим информацию о положении заготовки на рабочем поле установки (см. рис. 4 в статье [9]).

Однако для внедрения любого способа компенсации деформации ПП на этапе экспонирования необходимы разработка и программная реализация метода совмещения отображаемого на ЖК-матрице шаблона с заготовкой. Для подготовки к позиционированию необходима калибровка установки, посредством которой формируется взаимосвязь изображения с видеокамеры и отображаемого на ЖК-матрице изображения.

Калибровка установки. Установка экспонирования работает с тремя типами изображений. К первому типу относятся изображения топологии, сгенерированные в оригинальном разрешении ЖК-матрицы 3840×2400 (далее — оригинал, рис. 1, а). По этим изображениям можно получить информацию о расположении элементов проводящего рисунка. Ко второму

типу относятся перекодированные изображения-оригиналы с разрешением 1280×2400 , которые необходимы для корректного отображения топологии на ЖК-матрице (далее — шаблон, рис. 1, б) [9]. К третьему типу относятся полученные с видеокамеры изображения рабочего поля установки (далее — фото, рис. 1, в) с разрешением 3264×2488 .

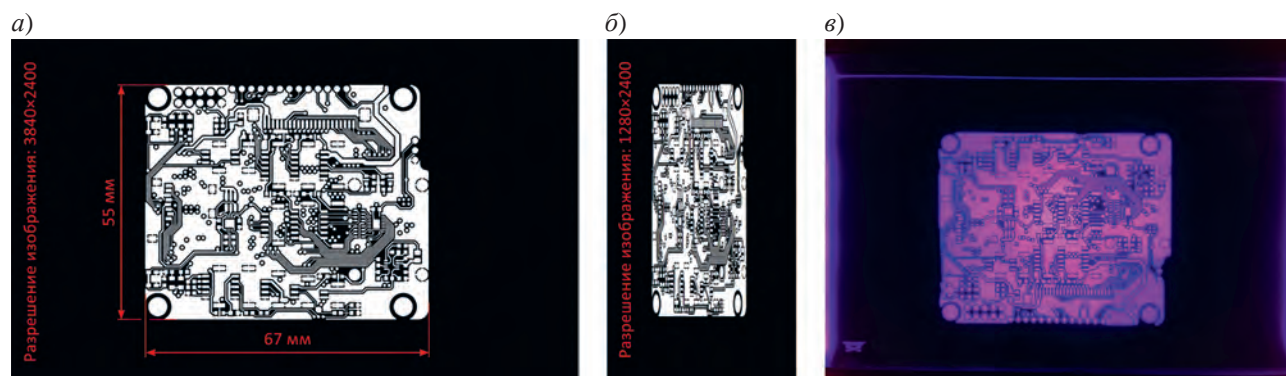


Рис. 1

Для калибровки установки необходимо проанализировать оригинал и фото. Оба изображения характеризуются собственными системами координат, операция калибровки необходима для определения связи между ними. В качестве базовой используется система координат оригинала, так как на ее основе генерируется шаблон для отображения на ЖК-матрице, т. е. основной задачей калибровки является математическое описание для перехода из системы координат видеокамеры в систему оригинала. В условиях незначительного влияния проекционных искажений [11, 12] и дисторсии [13] на изображение с видеокамеры такой переход осуществим с помощью аффинных преобразований [14]. Тогда совокупное преобразование может быть описано комбинацией трех его составляющих: поворота (рис. 2, а), растяжения (б) и сдвига (в). На рис. 2 приведены виды аффинных преобразований для совмещения фото (пунктир) и оригинала (сплошная кривая); ε — составное преобразование (композиция преобразований, включающая поворот, растяжение и сдвиг).

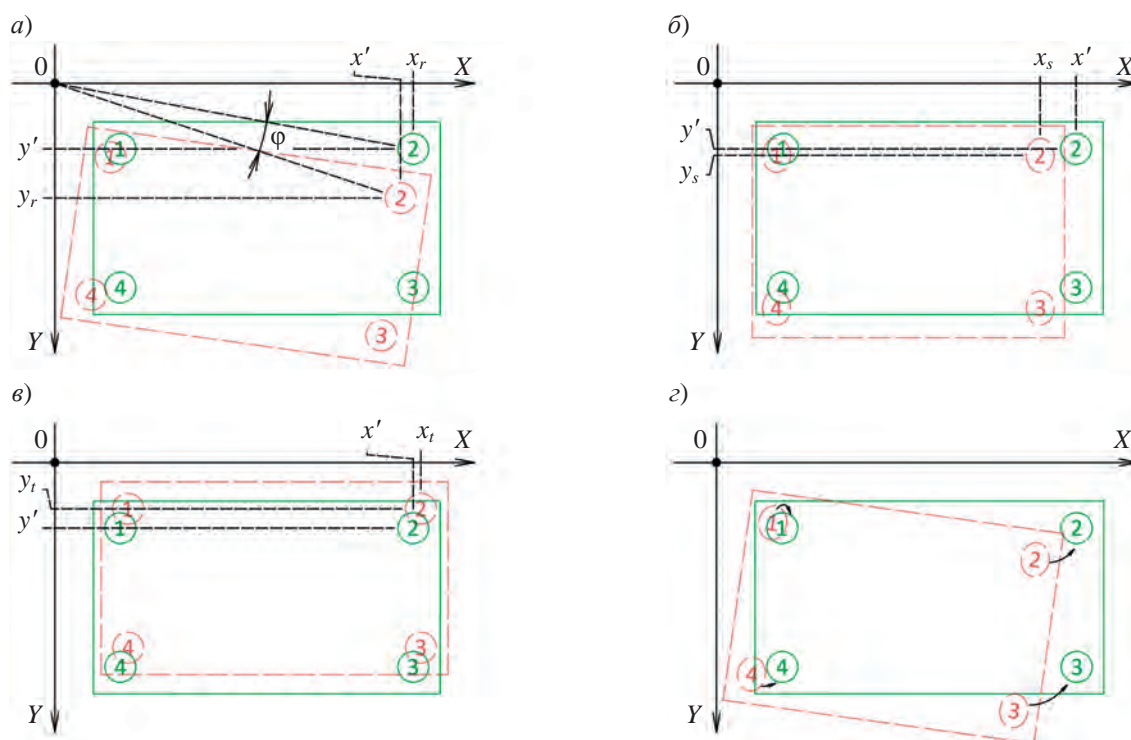


Рис. 2

Аффинные преобразования для поворота, растяжения и сдвига описываются уравнениями:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\varphi & -\sin\varphi \\ \sin\varphi & \cos\varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_r \\ y_r \end{pmatrix}; \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_x & 0 \\ 0 & s_y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_s \\ y_s \end{pmatrix}; \quad (2)$$

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_t \\ y_t \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где x', y' — координаты точки после преобразования; φ — угол поворота изображения; x_r, y_r — координаты точки на изображении до поворота; s_x, s_y — коэффициенты растяжения изображения по осям; x_s, y_s — координаты точки на изображении до растяжения; t_x, t_y — значения сдвига изображения по осям; x_t, y_t — координаты точки на изображении до сдвига.

Тогда в общем виде комбинация этих преобразований может быть описана формулой:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Таким образом, задача калибровки сведена к определению коэффициентов a и b , что может быть осуществлено следующим способом (рис. 3, а). На ЖК-матрицу выводится шаблон, содержащий матрицу кругов, и видекамера производит серию снимков. Затем с помощью преобразования Хафа (реализован в программном модуле библиотеки компьютерного зрения OpenCV [15–17]) происходит распознавание кругов на оригинале (рис. 3, б) и фото (в).

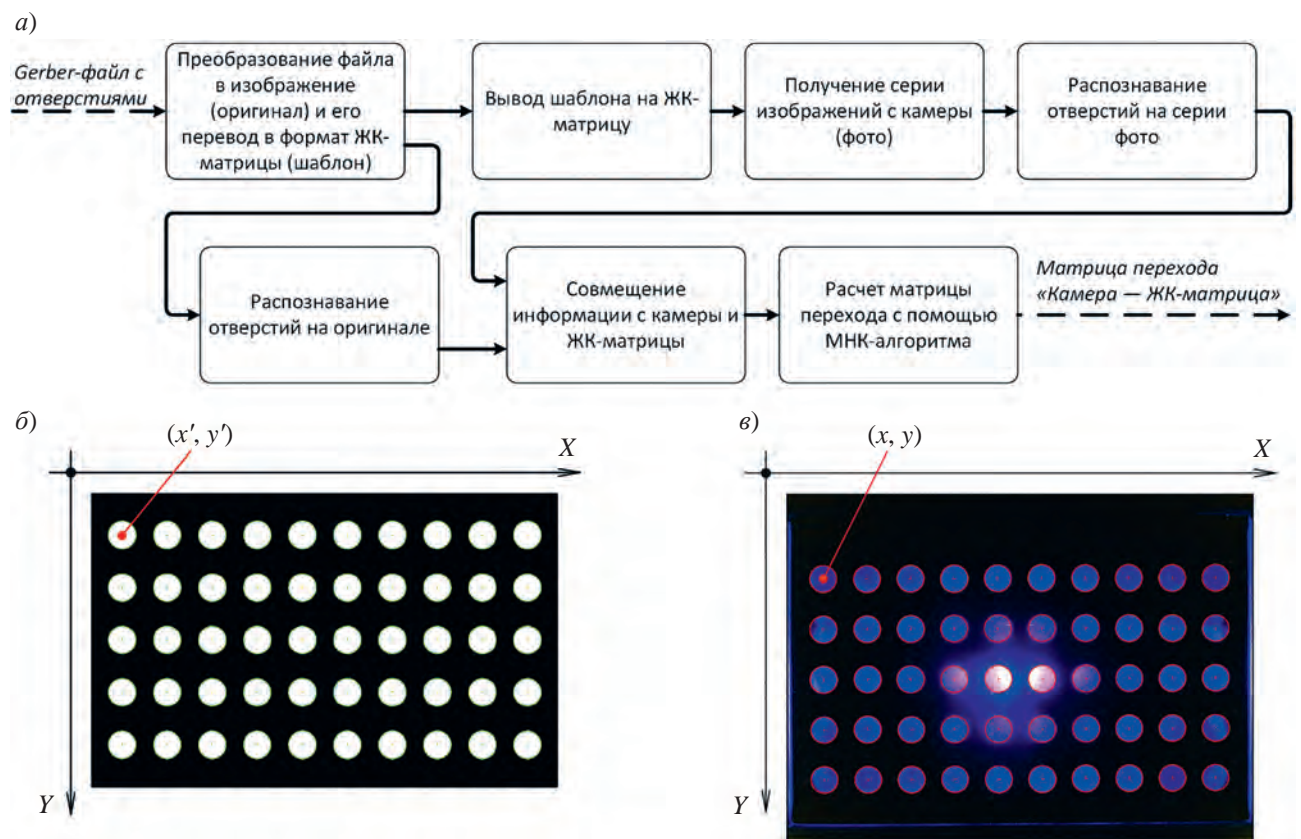


Рис. 3

Далее производится совмещение полученной информации с видеокамеры и ЖК-матрицы — отсекаются некорректные результаты распознавания, обеспечивается идентичность результатов распознавания (т. е. на изображениях с двух источников должны присутствовать одни и те же круги), а также производится их сортировка, которая обеспечивает сопоставление координат центров идентичных кругов. Тогда оценить коэффициенты матрицы перехода можно с помощью алгоритма метода наименьших квадратов (МНК) [18]:

$$\hat{\theta}_{\text{МНК}} = (\mathbf{C}^T \mathbf{C})^{-1} \mathbf{C}^T \mathbf{Z}, \quad (5)$$

где $\hat{\theta}_{\text{МНК}} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & b_1 \\ a_{21} & a_{22} & b_2 \end{pmatrix}$ — матрица аффинного преобразования „видеокамера–ЖК-матрица“;

$\mathbf{C}^T = \begin{pmatrix} x_{1,1} & x_{1,N} & x_{M,1} & x_{M,N} \\ y_{1,1} & \dots & y_{1,N} & \dots & y_{M,1} & \dots & y_{M,N} \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$ — матрица измерений, в которой хранится информация о координатах центров распознанных кругов $(x_{i,j}, y_{i,j})$ на фотографиях с видеокамеры (i — номер изображения с камеры от единицы до M , j — номер круга на изображении от единицы до N), таким образом, матрица \mathbf{C}^T содержит $M \times N$ столбцов; $\mathbf{Z}^T = \begin{pmatrix} x'_1 & x'_N & x'_1 & x'_N \\ y'_1 & y'_N & y'_1 & y'_N \end{pmatrix}$ — матрица с распознанными координатами центров кругов на оригинале (x'_j, y'_j) , которые соответствуют координатам $(x_{i,j}, y_{i,j})$. Поскольку к одному центру на оригинале относится несколько центров на фотографиях, то матрица \mathbf{Z}^T также содержит $M \times N$ столбцов.

Однако для применения МНК-алгоритма необходимо обеспечить совмещение информации о центрах кругов, полученных с шаблона и фотографий, что требует выполнения двух условий: на изображениях присутствуют одни и те же круги, а также известна информация о взаимосвязи центров между изображениями. Первое условие осуществимо при настройке параметров для преобразования Хафа, которые могут быть определены эмпирически при наложении требований к неизменности освещения и положения видеокамеры относительно ЖК-матрицы. Выполнение второго условия обеспечивается эквивалентностью порядка следования распознанных кругов на изображениях, т. е. сортировкой (рис. 4; изображение повернуто относительно видеокамеры: a — по часовой стрелке, b — против). Ввиду идентичности начальных условий и требований этот алгоритм также может быть использован во время операции совмещения систем координат изображения шаблона и изображения заготовки с видеокамеры по просверленным отверстиям или другим реперным знакам.

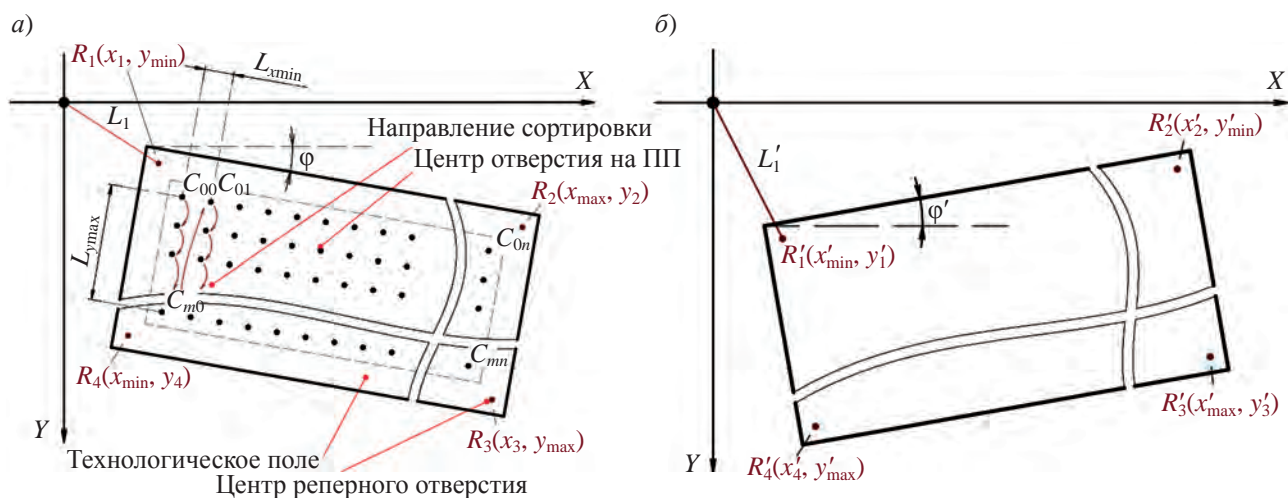


Рис. 4

Процедура сортировки должна быть нечувствительна к наличию незначительного угла поворота у изображения, обусловленному погрешностью при установке видеокамеры, а также к возможному смещению центра круга из-за неточности распознавания, вызванной цифровым шумом видеокамеры. В качестве критерия сортировки β предлагается использовать сумму координат центра круга с применением к одной из координат весового коэффициента α ($0 \leq \alpha \leq 1$):

$$\beta_j = x_j + \alpha y_j. \quad (6)$$

Для использования критерия β необходимо определить диапазон возможных значений весового коэффициента α , который обеспечит корректность сортировки. Значение коэффициента ограничено сверху функциональной связью, зависящей от минимального расстояния между центрами в одном ряду $L_{x\min}$ и максимальным расстоянием между центрами в одном столбце $L_{y\max}$, а также от угла поворота заготовки φ . Снизу величина ограничена шумами видеокамеры и производственными погрешностями, которые смещают центры кругов на изображении заготовки.

Тогда желаемый порядок сортировки центров $C_{00}, C_{10}, C_{m0}, \dots, C_{01}, C_{11}, \dots, C_{mn}$ (m — число рядов центров на изображении, n — число столбцов) можно представить в виде неравенства: $\beta_{00} < \beta_{10} < \dots < \beta_{m0} < \beta_{01} < \beta_{11} < \dots < \beta_{mn}$. Поскольку отверстия на заготовке могут находиться не в виде прямоугольной матрицы, то для поиска коэффициента в качестве предельного случая можно рассмотреть только центры, находящиеся на минимальном расстоянии в одном ряду $L_{x\min}$ и максимальном расстоянии в одном столбце $L_{y\max}$. Допустим, что таковыми являются центры $C_{00}(x_0, y_0)$, $C_{m0}(x_0 - L_{y\max}\sin\varphi, y_0 + L_{y\max}\cos\varphi)$, $C_{01}(x_0 + L_{x\min}\cos\varphi, y_0 + L_{x\min}\sin\varphi)$. Тогда наиболее жестким условием является $\beta_{m0} < \beta_{01}$. Подставим координаты центров $C_{m0} < C_{01}$ в выражение (6) и получим неравенство:

$$x_0 - L_{y\max}\sin\varphi + \alpha(y_0 + L_{y\max}\cos\varphi) < x_0 + L_{x\min}\cos\varphi + \alpha(y_0 + L_{x\min}\sin\varphi). \quad (7)$$

Из неравенства (7) можно в явном виде выразить:

$$\alpha < \frac{L_{x\min} + L_{y\max}\operatorname{tg}\varphi}{L_{y\max} + L_{x\min}\operatorname{tg}\varphi}. \quad (8)$$

Выражение (8) позволяет определить максимальное значение весового коэффициента α в зависимости от расположения отверстий и угла поворота заготовки φ . При варьировании значения угла поворота заготовки определено, что корректная сортировка с помощью предложенного критерия (6) невозможна, если изображение повернуто против часовой стрелки, так как величина α принимает отрицательные значения. Эта проблема может быть преодолена предварительным доворотом изображения, что требует определения направления и угла доворота. Оба параметра могут быть получены путем анализа положения кругов на краях изображения: в качестве таких кругов могут выступать реперные отверстия на заготовке. При этом необходимо, чтобы два круга (например, R_1 и R_2) лежали на прямой, параллельной оси абсцисс.

Сначала необходимо определить расположение реперных отверстий на изображении: если заготовка повернута по часовой стрелке, то они будут иметь координаты $R_1(x_1, y_{\min})$, $R_2(x_{\max}, y_2)$, $R_3(x_3, y_{\max})$, $R_4(x_{\min}, y_4)$; для угла против часовой стрелки — $R'_1(x'_{\min}, y'_1)$, $R'_2(x'_2, y'_{\min})$, $R'_3(x'_{\max}, y'_3)$, $R'_4(x'_4, y'_{\max})$, таким образом, идентификация этих реперных отверстий возможна путем сортировки всех отверстий по x и y . Затем определяется такое реперное отверстие, у которого расстояние до начала координат будет минимально. Если угол необходимого доворота по модулю не превышает 90° , то центр реперного отверстия $R_1(x_1, y_{\min})$ имеет минимальное расстояние при довороте изображения по часовой стрелке, в противном случае — $R'_1(x'_{\min}, y'_1)$. На последнем этапе вычисляется угол доворота с использованием уравнения прямой, проходящей через точки R_1 и R_2 , R'_1 и R'_2 для двух случаев соответственно:

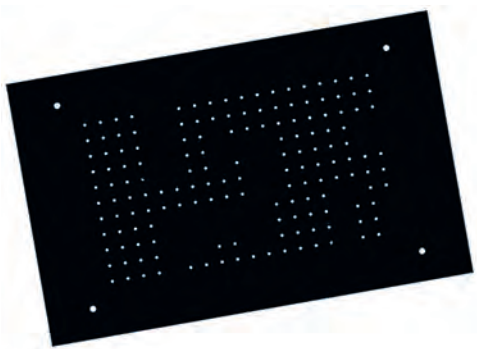
$$\varphi = \operatorname{arctg}\left(\frac{y_2 - y_{\min}}{x_{\max} - x_1}\right), \quad (9)$$

$$\varphi' = \operatorname{arctg}\left(\frac{y_{\min} - y_1}{x_2 - x_{\min}}\right). \quad (10)$$

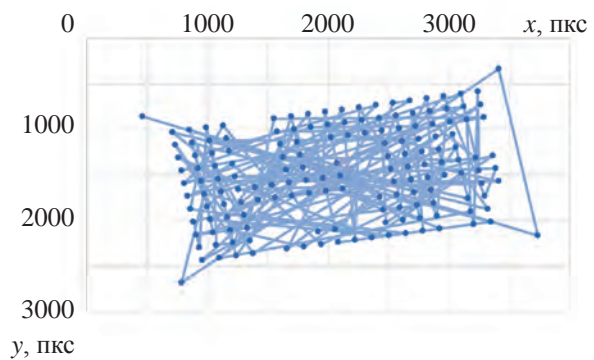
Поворот изображения на полученный угол позволит использовать предложенную процедуру сортировки для изображений вне зависимости от исходного знака угла между изображениями, а выражение (8) для поиска весового коэффициента α преобразуется к виду:

$$\lim_{\varphi \rightarrow 0} \alpha = \alpha_{\max} = \frac{L_{x\min}}{L_{y\max}}.$$

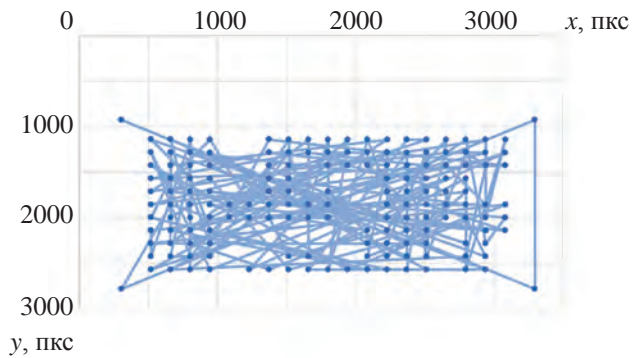
а)



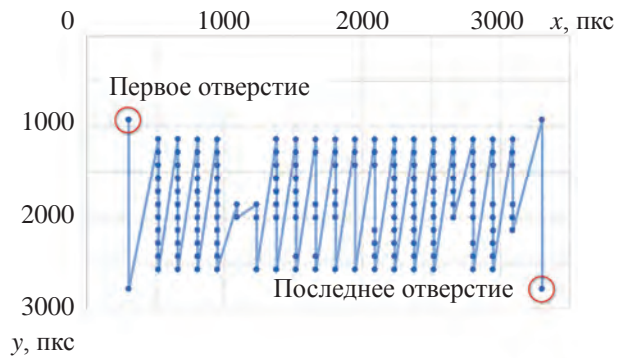
б)



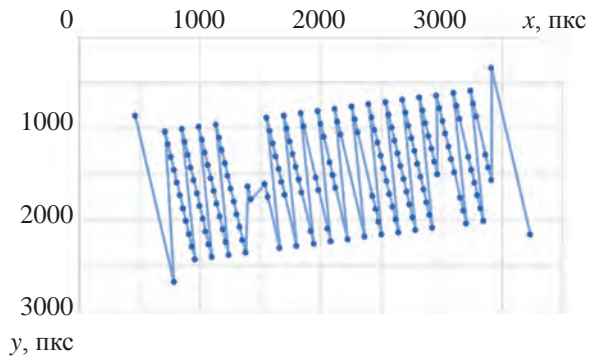
в)



г)



д)



е)

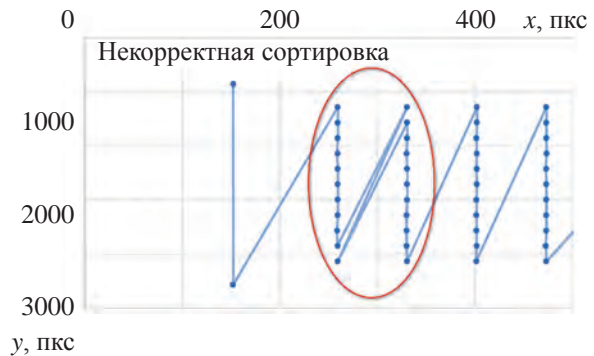


Рис. 5

Поскольку снизу значение α ограничено погрешностью смещения центра отверстия (цифровым шумом видеокамеры, ошибками предобработки изображения и последующего распознавания, деформацией заготовки и смещением отверстий при сверлении), рекомендуется выбирать значение $\alpha = 0,5\alpha_{\max} - 0,9\alpha_{\max}$. На рис. 5 представлена реализация алгоритма сортировки ($L_{x\min} = 5$ мм, $L_{y\max} = 72,5$ мм): *a* — исходное изображение; *b* — после распознавания; *в* — после поворота; *г* — после сортировки ($\alpha = 0,9\alpha_{\max} \approx 0,06$); *д* — наложение результата на исходные координаты; *е* — результат некорректной сортировки ($\alpha = 0,1\alpha_{\max} \approx 0,01$).

Таким образом, с помощью алгоритма калибровки на основе анализа выборки из ста фотографий сформирована матрица перехода от фотографии к ЖК-матрице и произведена визуальная и статистическая оценка результатов наложения. Рис. 6, *a* содержит результат применения алгоритма калибровки, совмещенный с оригинальным изображением (отклонение увеличено в 15 раз): можно наблюдать наличие проекционных искажений, обусловленных неперпендикулярностью оси видеокамеры плоскости съемки, а также дисторсией (рис. 6, *a*, 1). Также на полученной карте заметно равномерное увеличение смещения относительно центра (рис. 6, *a*, 2), которое обусловлено неравномерностью количества получаемого видеокамерой света по рабочему полю установки и ошибками в распознавании центров кругов (см. рис. 3, *в*, круги по центру рабочего поля имеют большую яркость, чем крайние). На рис. 6, *б* представлена гистограмма смещения центра относительно оригинала по оси *X*; *в* — по оси *Y*.

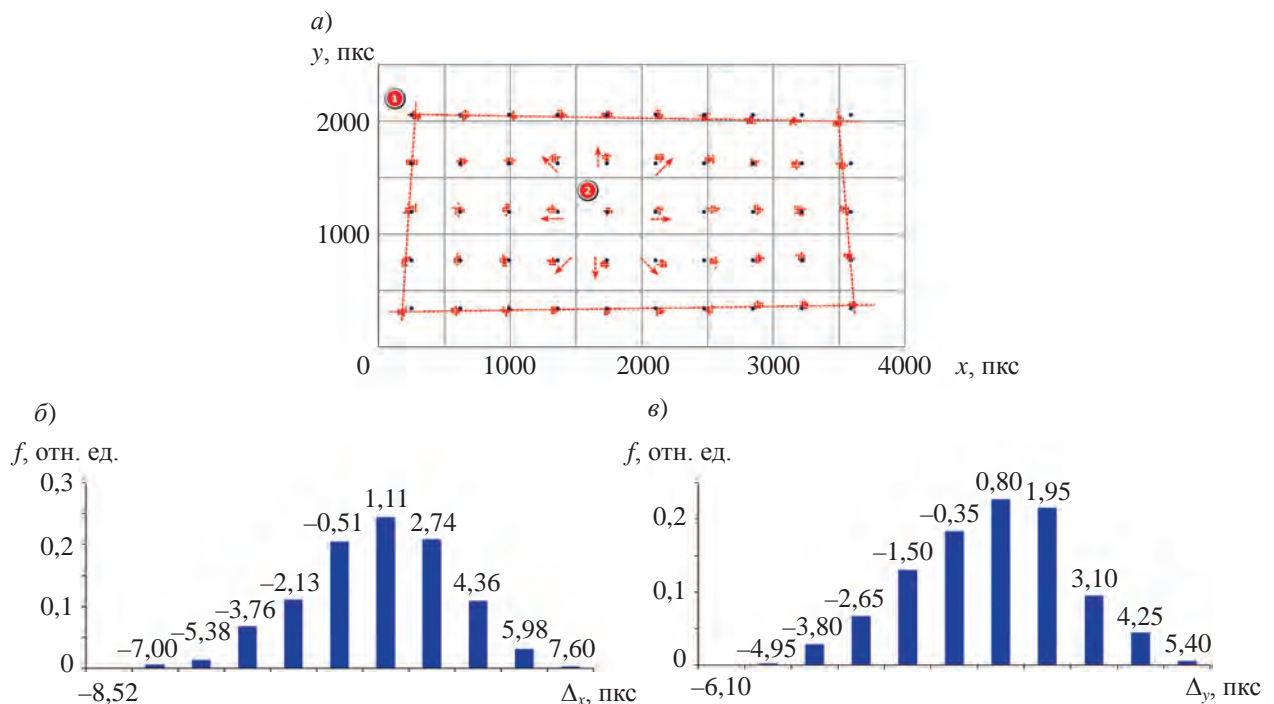


Рис. 6

В результате статистического анализа среднеквадратическое отклонение составляет около 3 и 2 пикселей по осям *X* и *Y* соответственно, что при размере пиксела ЖК-матрицы 35 мкм говорит о возможной ошибке позиционирования центра ± 300 мкм по оси *X* и ± 210 мкм по оси *Y*, это обуславливает минимальный размер контактной площадки [19]. Так, с учетом максимального значения отклонения центра и требования к минимальной ширине гарантийного пояса 50 мкм для обеспечения возможности бездефектного изготовления заготовки по третьему классу надежности по стандарту IPC-A-600G¹ диаметр контактной площадки должен быть на 700 мкм больше диаметра отверстия.

¹ IPC-A-600G; Acceptability of Printed Boards. IPC International: Bannockburn, IL, USA, 2004.

Коррекция шаблона по положению заготовки. Получив матрицу перехода „видеокамера–ЖК-матрица“, перейдем к коррекции шаблона по положению заготовки на видеокамере. Для решения этой задачи предложен алгоритм совмещения шаблона топологии с заготовкой (рис. 7).



Рис. 7

Алгоритм совмещения содержит следующие этапы.

1. Преобразование gerber-файла сверловки в изображение с оригинальным разрешением (3840×2400). Это изображение является цифровым двойником заготовки, помещенной на рабочее поле установки.

2. Распознавание центров отверстий на оригинале сверловки.

3. Определение параметров распознавания для фотографий с видеокамеры. Поскольку при распознавании кругов на оригинале сверловки отсутствуют погрешности, обусловленные цифровыми шумами видеокамеры и влиянием других технологических операций, то корректное распознавание отверстий доступно в довольно широком диапазоне параметров поиска: минимального и максимального диаметра кругов и минимального расстояния между ними (в работе использовались параметры 0,5, 5 и 1 мм соответственно). Однако качество распознавания кругов на фотографии существенно зависит от этих параметров. Поэтому по результатам распознавания оригинала сверловки определяются требуемые параметры для фотографий с учетом погрешности определения центров 10 %.

4. Размещение заготовки с нанесенным фоторезистом на рабочем поле вниз стороной, предназначенной для экспонирования, с последующей фиксацией для обеспечения плотного контакта между фоторезистом и ЖК-матрицей. В настоящее время не допускается поворот заготовки на угол более 90° на рабочем поле относительно положения оригинала сверловки.

5. Получение с видеокамеры изображения заготовки с включенной подсветкой (рис. 8, б). На данном этапе необходимо обеспечить как можно более четкую видимость отверстий на заготовке, что обуславливает задачу определения параметров подсветки и материала пленки, обеспечивающей прижим заготовки. С одной стороны, подсветка должна равномерно освещать рабочее поле заготовки, что возможно с применением рассеивателя; с другой — прозрачные пленки отражают свет от себя, создавая неравномерное излучение. В настоящее время для прижима используется матовая пленка KIMOTO LASERFILM, однако ее прозрачности недостаточно для распознавания отверстий на заготовках с двусторонним нанесением фоторезиста.

6. Перевод фотографии в систему координат ЖК-матрицы с помощью матрицы перехода „видеокамера–ЖК-матрица“, определенной на этапе калибровки.

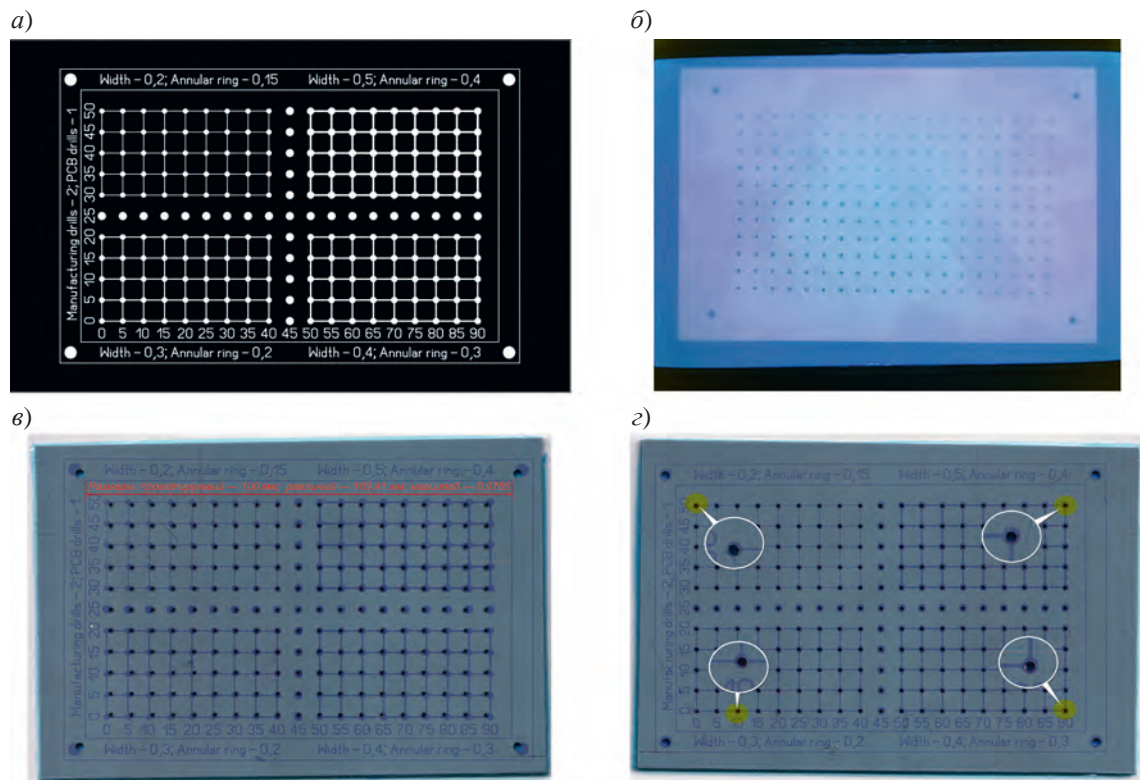


Рис. 8

7. Распознавание отверстий на изображении с видеокамеры.
8. Сортировка и сопоставление отверстий по описанной ранее процедуре калибровки.
9. Перевод gerber-файла топологии проводящего слоя в изображение-оригинал.
10. Определение компенсирующей матрицы перехода между оригиналом сверловки и фотографией заготовки, переведенной в систему координат ЖК-матрицы по распознанным отверстиям. Применение этой матрицы перехода к изображению топологии слоя обеспечит сопоставление проводящего рисунка и заготовки на рабочем поле установки. Также на этом этапе происходит масштабирование изображения, необходимость которого обусловлена толщиной заготовки, изменяющей расстояние от плоскости съемки до видеокамеры. Масштабный коэффициент (рис. 8, в) может быть получен путем пробного экспонирования без масштабирования с последующим определением отношения какого-либо линейного размера на заготовке после экспонирования к проектируемому значению (для заготовки толщиной 1,5 мм значение масштабного коэффициента, определенного предложенным способом, составляет 0,977).
11. Перевод компенсированного оригинала топологии слоя в изображение-шаблон и вывод его на ЖК-матрицу.

Для проверки работоспособности алгоритма совмещения разработан тестовый образец печатной платы (рис. 8, а) с отверстиями диаметром 1 мм, расположенными в виде прямоугольной матрицы; ширина дорожек варьирует от 200 до 500 мкм с шагом 100 мкм; проектируемая ширина пояса контактной площадки: 150, 200, 300 и 400 мкм. Результат экспонирования представлен на рис. 8, г. Попадание всеми отверстиями в контактные площадки подтверждает работоспособность алгоритма.

Таким образом, успешно проэкспонирована заготовка третьего класса точности по ГОСТ Р 53429-2009² без критических смещений проводящего рисунка. Также следует отметить, что предложенный алгоритм менее чувствителен к погрешностям сверления, поскольку матрица перехода формируется по всем отверстиям на заготовке, а не только технологическим. Однако

² ГОСТ Р 53429-2009. Платы печатные. Основные параметры конструкции. М.: Стандартинформ, 2018.

в случае необходимости возможно совмещение только по технологическим отверстиям или реперным знакам, что необходимо при изготовлении внутренних слоев МПП.

Заключение. В ходе проведенного исследования разработан метод совмещения шаблона и заготовки, предназначенный для использования в установке прямого экспонирования на основе ЖК-матрицы, в том числе:

1) разработан алгоритм калибровки положения видеокамеры относительно рабочего поля заготовки, который позволяет на основе аффинных преобразований путем наложения изображений по отверстиям определить матрицу перехода „видеокамера–ЖК-матрица“;

2) предложен способ сопоставления отверстий или других реперных знаков на изображениях для определения матрицы перехода между ними, а также определены возможности и границы его использования;

3) разработан алгоритм совмещения шаблона по фотографии заготовки на рабочем поле;

4) путем экспериментального тестирования определена погрешность позиционирования шаблона ± 300 мкм и подтверждена работоспособность предложенных алгоритмов для переноса проводящего рисунка, соответствующего требованиям к ПП третьего класса точности по ГОСТ Р 53429-2009.

В ходе выполнения работы определена необходимость в:

1) доработке способа позиционирования и настройки видеокамеры для минимизации проекционных искажений и исключения влияния дисторсии, что в конечном итоге определяет возможности увеличения класса точности изготавливаемых печатных плат;

2) исследовании методов снижения погрешности распознавания отверстий на заготовке для обеспечения возможности двустороннего нанесения фоторезиста, в том числе: разработки алгоритмов дополнительной предобработки изображений с видеокамеры, создания более равномерной системы подсветки, замены материала пленки, обеспечивающей плотное прилегание заготовки к ЖК-матрице.

Разработанный метод позволил автоматизировать процессы позиционирования заготовки на рабочем поле и экспонирования с помощью систем на основе ЖК-матрицы в целом. Предложенные алгоритмы являются методическим базисом для обработки изображений слоев ПП, с помощью которых становится возможным исследование методов компенсации деформации ПП на этапе экспонирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев Ф. В. Физическая надежность электроники. М.: МАИ, 2022. 160 с.
2. Платы печатные: Справочник / Под ред. К. Ф. Кумбза. В 2 кн. Кн. 1. М.: Техносфера, 2011. 1016 с.
3. Медведев А. М., Сокольский А. М. Технологическое обеспечение надежности электрической изоляции электронных сборок авионики // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2015. № 11. С. 41–44.
4. Ванцов С., Хомутская О., Лийн Е. Влияние конструктивных параметров на плоскую деформацию печатных плат // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2023. № 8(229). С. 108–113.
5. Никитин С., Поздняков К., Хомутская О. Оценка деформации печатных плат // Производственные технологии. 2019. № 5. С. 144–150.
6. Khomutskaya O. V., Medvedev A. M., Korobkov M. A. et al. The Method of Automated Evaluation of the Deformation of the Printed Circuit Board // Proc. of ICOECS. 2021. P. 510–512. DOI: 10.1109/ICOECS52783.2021.9657420.
7. Коробков М. А., Зайкин В. Д., Мареичев Е. С. и др. Система прямого экспонирования на основе жидкокристаллической матрицы // Научное приборостроение. 2023. № 33(1). С. 65–85.
8. Коробков М. А., Зайкин В. Д. Метод масочной компенсации неравномерности излучения в системе прямого экспонирования на основе жидкокристаллической матрицы // Труды МАИ. 2023. № 132.
9. Коробков М. А. Применение установки прямого экспонирования на основе жидкокристаллической матрицы для компенсации деформации печатных плат // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 7. С. 622–632. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-7-622-632.
10. Цветков Ю. Б. Управление топологической точностью фотолитографии: учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. 174 с.

11. Новиков А. И., Саблина В. А., Горячев Е. О. Применение контурного анализа для совмещения изображений // Известия ТулГУ. Технические науки. 2013. № 9-1. С. 260–270.
12. Косарев О. В., Дементьева Е. Г., Катунцов Е. В. и др. Алгоритм совмещения двумерных изображений методами контурного анализа // Вестник РГРТУ. 2021. № 75. С. 24–33.
13. Глаголев В. М. Описание и программное устранение дисторсии объективов // Известия ТулГУ. Технические науки. 2017. № 9-2. С. 188–194.
14. Бахрушина Г. И. Моделирование геометрических атак на основе аффинных преобразований // Ученые заметки ТОГУ. 2013. Т. 4, № 4. С. 1291–1297.
15. Максимов Н. А., Склеймин Ю. Б., Шаронов А. В. Программный комплекс построения маршрута движения беспилотного авиационного комплекса при его перебазировании в зону действия // Вестник Московского авиационного института. 2016. Т. 23, № 3. С. 102–111.
16. Максимов Н. А., Малюта Е. В., Шаронов А. В. Система автоматизированного учета повреждений воздушного судна, зафиксированных при предполетном осмотре // Вестник Московского авиационного института. 2015. Т. 22, № 4. С. 85–90.
17. Максимов А. Н., Александров А. А., Романов В. Д. Метод чтения кадров с видеокамер и реализации алгоритмов обработки видеоизображений в программах на языках стандарта IEC 61499 // Научно-технический вестник Поволжья. 2022. № 4. С. 96–98.
18. Шаронов А. В. Методы и алгоритмы обработки результатов экспериментальных исследований. М.: Изд-во МАИ, 2004.
19. 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, N 3. P. 77. DOI: <https://doi.org/10.3390/inventions8030077>.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Максим Андреевич Коробков

— аспирант; Московский авиационный институт (государственный технический университет), кафедра 307 „Цифровые технологии и информационные системы“; старший преподаватель; E-mail: josef_turok@bk.ru

Артем Сергеевич Демидов

— студент; Московский авиационный институт (государственный технический университет), кафедра 307 „Цифровые технологии и информационные системы“; инженер; E-mail: art.dem37@gmail.com

Ольга Владиславовна Хомутская

— канд. техн. наук, доцент; Московский авиационный институт (государственный технический университет), кафедра 307 „Цифровые технологии и информационные системы“; доцент; E-mail: khomutskayaov@gmail.com

Поступила в редакцию 21.08.24; одобрена после рецензирования 08.10.24; принята к публикации 27.02.25.

REFERENCES

1. Vasiliev F.V. *Fizicheskaya nadezhnost' elektroniki* (Physical Reliability of Electronics), Moscow, 2022, 160 p. (in Russ.)
2. Kumbz K.F., ed., *Platy pchatnyye: Spravochnik* (Printed Circuit Boards: Directory), Moscow, 2011, 1016 p. (in Russ.)
3. Medvedev A.M., Sokolsky A.M. *Sborka v mashinostroyenii, priborostroyenii*, 2015, no. 11, pp. 41–44. (in Russ.)
4. Vantsov S., Khomutskaya O., Liin E. *Electronics: Science, Technology, Business*, 2023, no. 8(229), pp. 108–113. (in Russ.)
5. Nikitin S., Pozdnyakov K., Khomutskaya O. *Proizvodstvennyye tekhnologii*, 2019, no. 5, pp. 144–150. (in Russ.)
6. Khomutskaya O.V., Medvedev A.M., Korobkov M.A. et al. *Proc. of ICOECS*, 2021, pp. 510–512, DOI: 10.1109/ICOECS52783.2021.9657420.
7. Korobkov M.A., Zaikin V.D., Mareichev E.S., Khomutskaya O.V., Vasiliev F.V. *Nauchnoe Priborostroenie* (Scientific Instrumentation), 2023, no. 1(33), pp. 65–85. (in Russ.)
8. Korobkov M.A., Zajkin V.D. *Trudy MAI*, 2023, no. 132. (in Russ.)
9. Korobkov M.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2024, no. 7(67), pp. 622–632, DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-7-622-632. (in Russ.)
10. Tsvetkov Yu.B. *Upravleniye topologicheskoy tochnost'yu fotolitografii* (Control of Topological Accuracy of Photolithography), Moscow, 2005, 174 p. (in Russ.)
11. Novikov A.I., Sablina V.A., Goryachev E.O. *News of the Tula state university. Technical sciences*, 2013, no. 9-1, pp. 260–270. (in Russ.)
12. Kosarev O.V., Dementieva E.G., Katuntsov E.V., Luntovskaya Y.A., Katelevsky D.A. *Vestnik of Ryazan State Radio Engineering University*, 2021, no. 75, pp. 24–33. (in Russ.)
13. Glagolev V.M. *News of the Tula state university. Technical sciences*, 2017, no. 9-2, pp. 188–194. (in Russ.)
14. Bakhrushina G.I. *Scientists notes PNU*, 2013, no. 4(4), pp. 1291–1297. (in Russ.)
15. Maximov N., Skleymin Yu., Sharonov A. *Aerospace MAI Journal*, 2016, no. 3(23), pp. 102–111. (in Russ.)

16. Maximov N., Malyuta E., Sharonov A. *Aerospace MAI Journal*, 2015, no. 4(22), pp. 85–90. (in Russ.)
17. Maximov A.N., Alexandrov A.A., Romanov V.D. *Scientific and Technical Volga Region Bulletin*, 2022, no. 4, pp. 96–98. (in Russ.)
18. Sharonov A.V. *Metody i algoritmy obrabotki rezul'tatov eksperimental'nykh issledovaniy* (Methods and Algorithms for Processing the Results of Experimental Studies), Moscow, 2004. (in Russ.)
19. Korobkov M.A., Vasilyev F.V., Khomutskaya O.V. *Inventions*, 2023, no. 3(8), pp. 77, DOI: <https://doi.org/10.3390/inventions8030077>.

DATA ON AUTHORS

- Maksim A. Korobkov** — Post-Graduate Student; Moscow Aviation Institute, Department of Digital Technologies and Information Systems; Senior Lecturer;
E-mail: josef_turok@bk.ru
- Artem S. Demidov** — Student; Moscow Aviation Institute, Department of Digital Technologies and Information Systems; Engineer; E-mail: art.dem37@gmail.com
- Olga V. Khomutskaya** — PhD, Associate Professor; Moscow Aviation Institute, Department of Digital Technologies and Information Systems;
E-mail: khomutskayaov@gmail.com

Received 21.08.24; approved after reviewing 08.10.24; accepted for publication 27.02.25.