

ПРИМЕНЕНИЕ УСТАНОВКИ ПРЯМОГО ЭКСПОНИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ МАТРИЦЫ ДЛЯ КОМПЕНСАЦИИ ДЕФОРМАЦИИ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

М. А. Коробков

Московский авиационный институт, Москва, Россия

josef_turok@bk.ru

Аннотация. Исследуется возможность применения лабораторного прототипа установки прямого экспонирования, использующего жидкокристаллическую (ЖК) матрицу для формирования топологии на фоточувствительном материале, для компенсации деформации печатных плат (ПП) в процессе их производства. Рассмотрены существующие способы оценки деформации ПП — предложен метод компенсации деформации на этапе экспонирования на основе метода контроля совмещаемости топологических слоев. Для предложенного метода определены упрощающие его реализацию допущения. Произведена аппаратная модернизация лабораторного образца установки путем добавления контура обратной связи в виде видеокамеры, предоставляющей информацию о положении ПП на рабочем поле. Определены элементы подготовки установки к работе. Разработан и протестирован алгоритм генерации изображений для отображения на ЖК-матрице.

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

Благодарности: работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 23-29-10204.

Ссылка для цитирования: 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.

APPLICATION OF THE DIRECT EXPOSURE UNIT BASED ON LS-MATRIX FOR COMPENSATION OF PRINTED CIRCUIT BOARDS DEFORMATION

M. A. Korobkov

Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

josef_turok@bk.ru

Annotation. The possibility of using a laboratory prototype of a direct exposure setup using a liquid crystal (LC) matrix to form a topology on a photosensitive material to compensate for printed circuit board (PCB) deformation during their production is investigated. Existing methods for assessing PCB deformation are considered — a method for compensating for deformation at the exposure stage based on the method of controlling the compatibility of topological layers is proposed. Assumptions simplifying its implementation are defined for the proposed method. The hardware upgrade of the laboratory prototype of the setup was performed by adding a feedback loop in the form of a video camera providing information on the PCB position on the working field. Elements of preparing the setup for operation are defined. An algorithm for generating images for display on the LCD matrix is developed and tested.

Keywords: PCB manufacturing, PCB deformation, direct exposure, digital photomask, reliability of PCB manufacturing processes

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

For citation: Korobkov M. A. Application of the direct exposure unit based on LS-matrix for compensation of printed circuit boards deformation. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 7. P. 622–632 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-7-622-632.

Введение. При производстве печатной платы (ПП) над заготовкой совершается ряд операций, таких как сверление, травление медной фольги, прессование и т. д. [1–3], в результате которых она деформируется. На рис. 1, а показана величина, характеризующая влияние различных технологических операций на значение деформации, которое количественно может быть выражено разбросом положения координат элементов проводящего рисунка относительно заложенного при проектировании. Деформация влечет за собой критичные для плат высокого класса точности последствия, например, значительное рассовмещение элементов проводящего рисунка на слоях друг относительно друга (рис. 1, б). Опасность данного явления заключается и в том, что оно трудно прогнозируется и практически не контролируется. Известны методические рекомендации [4, 5], применение которых на этапе конструирования печатного узла позволяет уменьшить негативное влияние деформации, однако их соблюдения уже недостаточно для ПП высокого класса точности (с пятого и выше согласно ГОСТ Р 53429-2009).

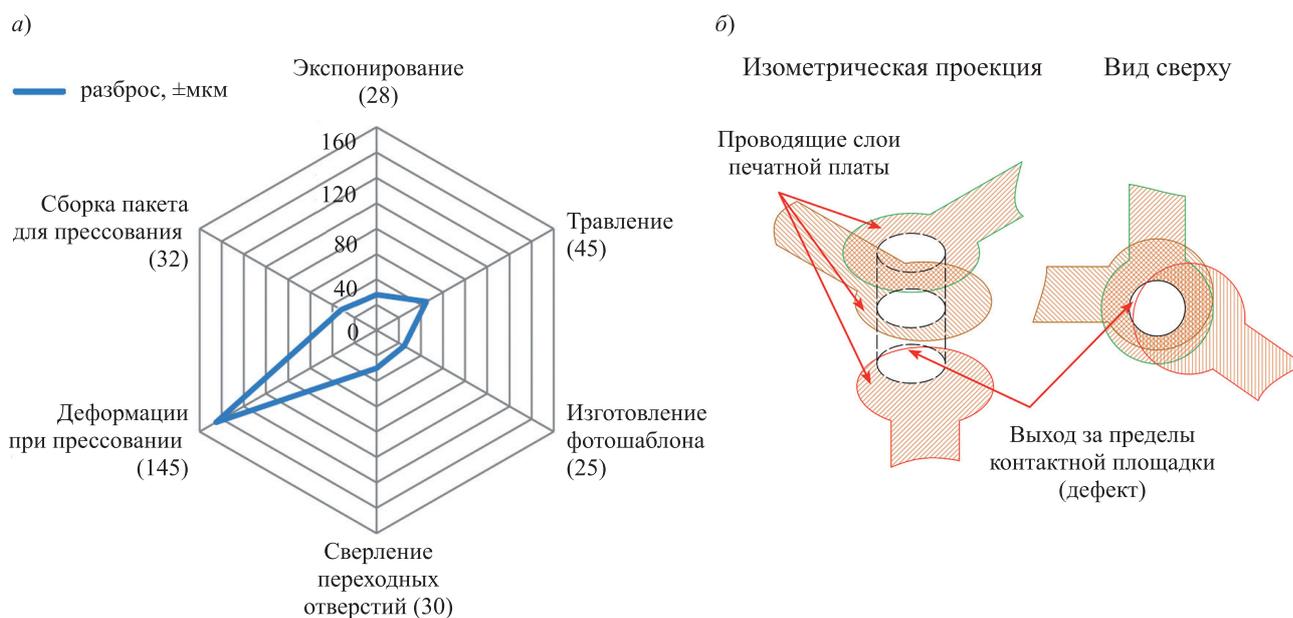


Рис. 1

Существуют исследования, позволяющие получить априорную оценку смещения элементов топологии проводящего рисунка [6, 7], что делает возможным внедрение в производственный процесс корректирующих воздействий для компенсации деформации, например, изменение топологии проводящего слоя на этапе конструирования или процесса технологической подготовки производства. Одной из потенциальных операций технологического процесса производства ПП, когда можно компенсировать деформацию, является экспонирование — формирование проводящего рисунка на поверхности заготовки.

В целом для разработки и исследования методов уменьшения влияния деформации при производстве ПП можно использовать любую систему экспонирования [8, 9], однако недостатки существующих установок затрудняют решение этой задачи. Основным недостатком установок контактного экспонирования — использование физических фотошаблонов, что влечет за собой сложность быстрого изменения топологии при проведении экспериментов, большое количество расходов на изготовление и хранение фотошаблонов, трудоемкость позиционирования фотошаблонов в силу зависимости их параметров от окружающей среды — температуры и влажности. Системы прямого экспонирования являются более предпочтительным вариантом для внедрения элементов компенсации деформации, так как имеют возможность изменять воспроизводимый рисунок программными методами, но такие установки дороги и труднодоступны.

Таким образом, для исследования методов компенсации деформации требуется дешевая и доступная установка экспонирования, которая позволит формировать изображение без фотошаблонов, что обеспечит возможность внесения корректировок в трассировку. В результате

исследований [10, 11] разработан прототип установки (рис. 2: *а* — модуль экспонирования, *б* — общий вид), использующий монохромную жидкокристаллическую (ЖК) матрицу для селективного пропускания света от источника излучения к фоточувствительному материалу (фоторезисту) и формирования рисунка топологии. Проведенные эксперименты подтвердили возможность получения на лабораторном стенде топологии, соответствующей четвертому классу точности по ГОСТ Р 53429-2009. Иными словами, установка, при низкой цене ее комплектующих, может быть конкурентоспособным аналогом систем экспонирования в классах опытного и мелкосерийного производства.

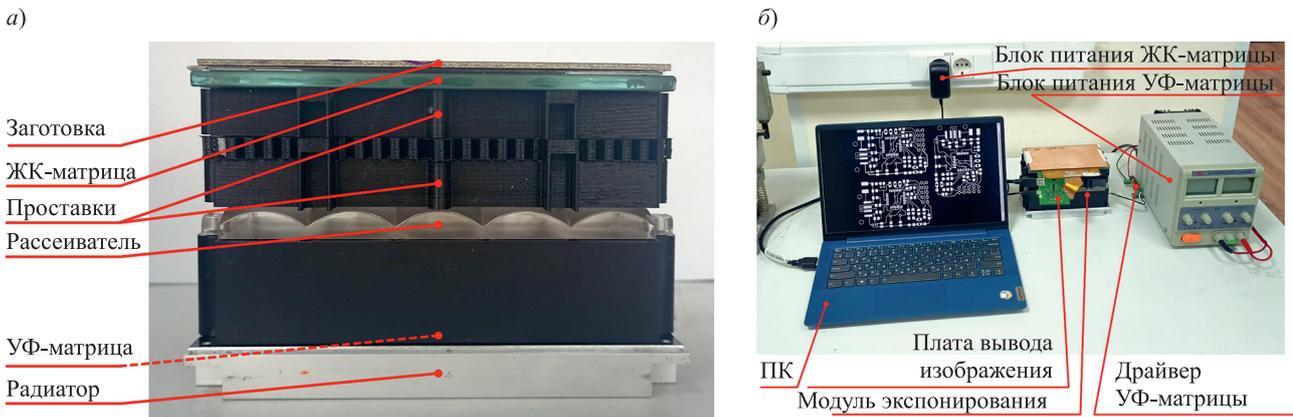


Рис. 2

Для исследования возможности компенсации деформации слоев с использованием данной установки необходимо:

- 1) определить возможные для реализации на этапе экспонирования способы компенсации деформации печатных плат;
- 2) внедрить систему обратной связи, позволяющую определить положение заготовки на рабочем поле установки;
- 3) определить составляющие процесса подготовки установки к работе: требуемые файлы проекта ПП и перечень необходимых операций.

Способы определения деформации ПП и возможность их применения на этапе экспонирования. Задача компенсации деформации слоев ПП тесно связана с задачей обеспечения совмещения элементов соединений в трехмерных печатных структурах, которой посвящено достаточно много работ, охватывающих проблему с разных сторон.

В [12, 13] определена суммарная погрешность совмещения элементов соединений в виде прикладной математической модели факторного анализа вероятности пространственного совмещения элементов соединений в трехмерных структурах многослойных печатных плат (МПП) А. М. Медведева. Модель основана на использовании вероятностного метода расчета плоских размерных цепей и учитывает деформационные процессы, происходящие с заготовками МПП, но позволяет только оценить возможность изготовления ПП на конкретном производстве и рассчитать надежность в зависимости от сложности конструкции.

В [14] отклонения координат печатных элементов и монтажных отверстий относительно номинальных положений являются следствием трех групп погрешностей: позиционирования рабочих органов технологического оборудования, совмещения и базирования плат на сверлильном станке, изменения координат печатных элементов на фотошаблонах и слоях вследствие размерной нестабильности фотопленок и тонких фольгированных диэлектриков. По результатам экспериментов определено, что при изготовлении ПП происходит изменение координат печатных элементов, но эта погрешность носит случайный характер.

Метод контроля совмещаемости топологических слоев, состоящий в разложении рассовмещений на отдельные составляющие, каждая из которых характеризует влияние того или иного фактора или их совокупностей, изложен в [15]. Основой для дифференцированной оценки

отдельных составляющих являются математические модели погрешностей совмещения, описывающие распределение погрешностей по полю топологического слоя. Рассовмещение в каждой точке платы представляется в виде совокупности составляющих: смещения, неортогональности, углового разворота, растяжения или сжатия и случайных факторов. При этом от точки к точке изменение рассовмещения будет изменяться систематическим образом, и если найти способ выделять в измеренных рассовмещениях отдельные составляющие, то можно определить способы для их устранения.

В [16, 17] предложен вариант развития метода контроля совмещаемости топологических слоев в виде методики компенсации деформации на этапе сверления. Методика подразумевает определение новых координат сверления переходных отверстий в ПП на основе проективных преобразований группы Ли (рис. 3, а: сплошная линия — эталон, штриховая — реальная заготовка). Таким образом, имея информацию о координатах четырех точек на эталоне (проект ПП) и реальной заготовке, можно определить функциональную связь между ними, которую можно использовать для определения новых координат сверления:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где x, y — координаты точки на эталоне; x', y' — координаты точки на заготовке ПП; $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3, c_1, c_2$ — коэффициенты матрицы преобразования.

Также предполагается возможность использования метода, если точек измерения на плате больше четырех, путем образования нескольких простых областей, описываемых четырьмя точками (рис. 3, б).

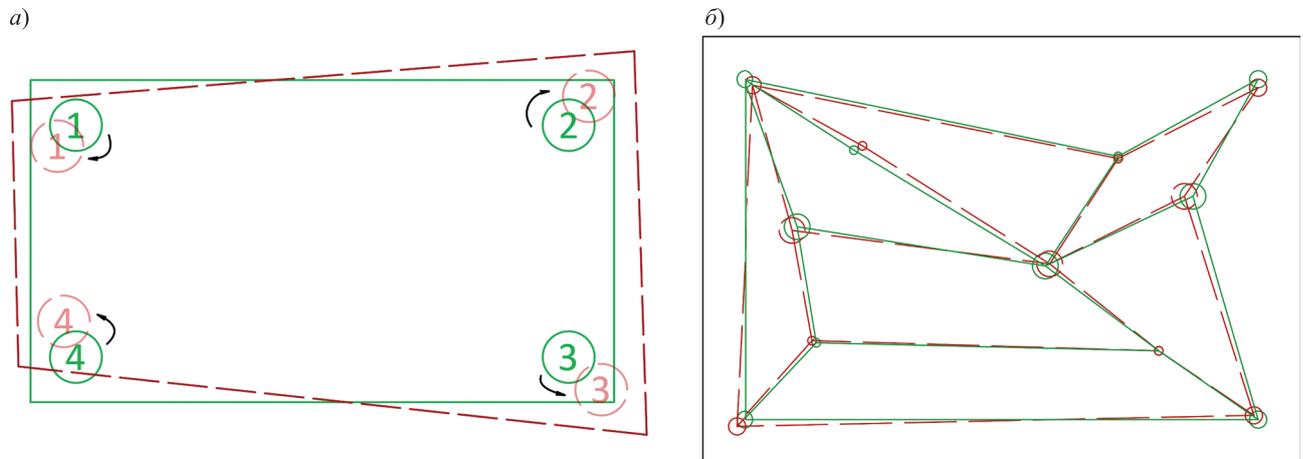


Рис. 3

Использование описанного метода возможно на этапе экспонирования, при этом в качестве точек для определения матрицы преобразования могут выступать как технологические отверстия на заготовке или специальные реперные знаки, так и все отверстия на ПП. Это возможно в случае, если операция экспонирования происходит после операции сверления, как, например, при тентинг-методе изготовления печатных плат. Тогда информация о расположении реперных знаков может быть получена с помощью системы компьютерного зрения. Однако использование этого метода требует дополнительного исследования в следующих случаях:

- определения фигуры для разбиения поверхности ПП — в качестве базового элемента для разбиения могут быть использованы не только четырехугольники, но и треугольники;
- определения количества и вида реперных знаков, так как они сами могут являться источниками погрешности;
- определения метода сегментации поверхности заготовки.

Предложенный метод можно использовать в качестве базы для компенсации деформации ПП, поскольку его применение в полной мере ограничено отсутствием информации о расположении координат эталонных точек на реальной заготовке. Использование в качестве реперных знаков только элементов на технологическом поле заготовки не позволит компенсировать деформацию сложного характера, появление которой возможно на ПП.

В [18] показано, что значение и направление вектора деформации зависит от многих факторов, в частности от топологии проводящего слоя, и предложена эмпирическая конечно-элементная модель для определения этих параметров. Оценка влияния топологии на величину деформации позволяет сделать вывод, что информации о смещении реперных знаков недостаточно для определения деформации во всех точках ПП и ее требуется дополнить вычисленными значениями на основе анализа проводящего рисунка. Однако также не определена возможность использования вычисленных параметров напрямую, т. е. влияние изменения проводящего рисунка непосредственно на вычисленную величину, так как такое действие может привести к другим значениям деформации вместо ее компенсации. Поэтому данный вопрос также требует экспериментального исследования, а анализ полученных результатов может быть осуществлен с помощью элементов машинного обучения [19].

Таким образом, для компенсации деформации ПП на этапе экспонирования возможно использовать метод контроля совмещаемости топологических слоев, дополненный информацией о деформации заготовки, полученной системой компьютерного зрения. Для практического исследования возможности компенсации предлагается на начальном этапе вместо проективных использовать аффинные преобразования:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

В качестве реперных знаков предлагается использовать все отверстия на ПП — в таком случае влияние случайных ошибок определения их координат на значения коэффициентов матрицы преобразования будет незначительным, однако проекционные искажения останутся некомпенсированными.

Доработка конструкции установки экспонирования. Для реализации выбранного способа компенсации деформации требуется доработка лабораторной установки прямого экспонирования на основе ЖК-матрицы, а именно внедрение контура обратной связи, предоставляющего информацию о положении заготовки. Реализация такого контура осуществлена на базе модуля видеокamеры (далее — камеры) с сенсором Sony IMX298 с программно настроенным разрешением 3264×2448 , которое сопоставимо с разрешением ЖК-матрицы — 3840×2400 . Для монтажа камеры на установку использован модуль вертикального перемещения 3D-принтера Anycubic Photon, а также спроектированы и изготовлены крепежный узел для камеры и основание установки. Плотное прилегание заготовки к ЖК-матрице в данном варианте обеспечивается механически. Схема и фотография прототипа доработанного модуля экспонирования приведены на рис. 4, а, б.

Далее определяется необходимая высота h камеры относительно ЖК-матрицы (рис. 5) по следующей формуле:

$$h = \frac{L}{2 \operatorname{tg}(\varepsilon/2)}, \quad (3)$$

где L — размер рабочей области ЖК-матрицы (134,4 и 84 мм); ε — угол обзора камеры (86° по обеим осям).

Выражение (3) задает минимальную высоту, при которой ЖК-матрица может поместиться на изображении, формируемом видеокamерой. Требуемая высота по двум осям составляет 72 и 44 мм. Из двух полученных значений выбрано максимальное. С учетом запаса высота камеры над ЖК-матрицей составляет 75 мм. Модуль вертикального перемещения позволяет увеличить качество формируемого изображения путем подстройки положения и фокуса камеры под размеры заготовки.

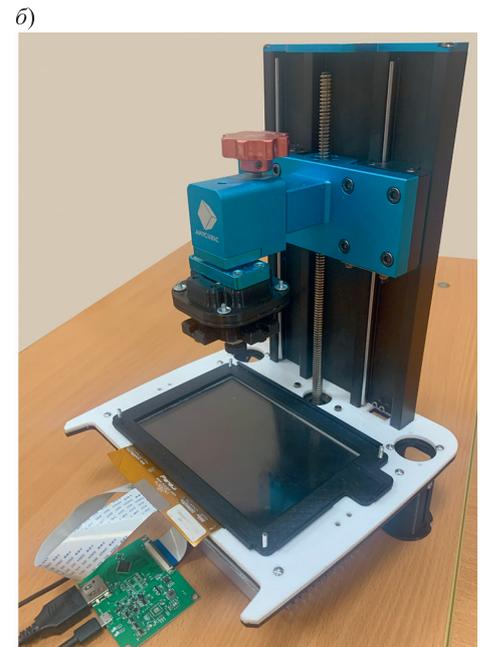
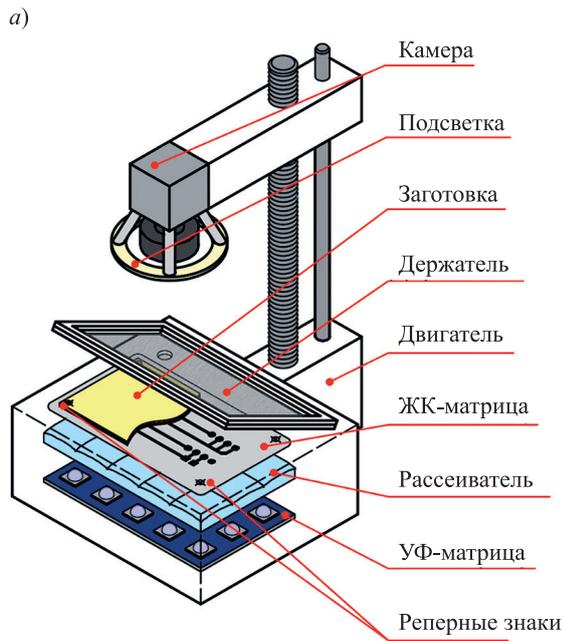


Рис. 4

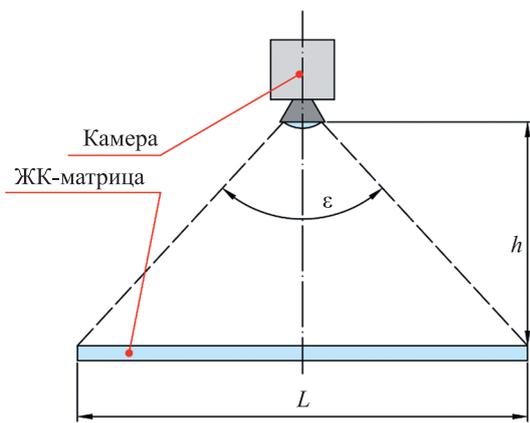


Рис. 5

Таким образом, установка дооснащена контуром обратной связи на основе камеры, предоставляющим информацию о положении заготовки на ЖК-матрице, что позволяет перейти к определению составляющих процесса подготовки установки к работе.

Подготовка установки прямого экспонирования на основе ЖК-матрицы к работе. Основным компонентом технологической подготовки установки к работе является процесс преобразования производственных файлов проекта печатной платы в изображения слоев, которые корректно будут отображаться на ЖК-матрице — генерация (рис. 6).

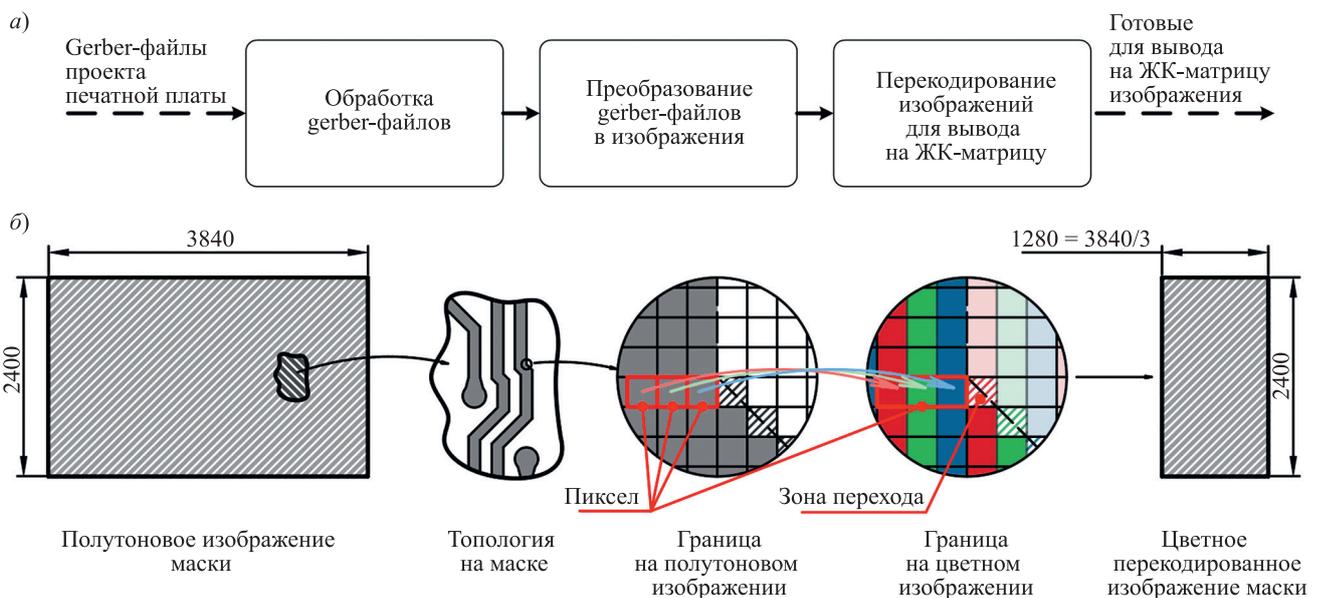


Рис. 6

Создание необходимых для производства изображений осуществляется на основе gerber-файлов проекта ПП и состоит из следующих этапов (рРис. 6, а).

1. *Обработка gerber-файлов.* Задачей этапа является подготовка файлов для их корректного преобразования в изображения, что главным образом обеспечивается соответствием их разрешения (3840×2400) и разрешающей способности ЖК-матрицы. Разрешающая способность ЖК-матрицы определена через размер пиксела ($34,6 \times 34,6$ мкм) и составляет около 734 точек на дюйм. Для обеспечения соответствия параметров изображений и ЖК-матрицы в gerber-файлы ПП добавлена окаймляющая проводящий рисунок рамка, размер которой соответствует размеру рабочей области установки ($134,4 \times 84$ мм). По рамке будет осуществляться обрезка сгенерированного изображения.

2. *Преобразование gerber-файлов в изображения.* Реализация этого этапа преимущественно производится с помощью набора модулей для рендеринга gerber-файлов pcb-tools 0.1.6 [20], разработанного на языке программирования Python. Набор модулей позволяет преобразовать gerber-файл в изображение формата png с заданным разрешением.

3. *Перекодирование изображения для вывода на ЖК-матрицу* (см. рРис. 6, б). ЖК-матрица определяется формирующим изображение компьютером как цветной монитор с разрешением 1280×2400 , в котором каждый пиксел состоит из красного, зеленого и синего субпикселов. Поэтому отображение изображения с разрешением 3840×2400 будет осуществляться некорректно. Так как матрица монохромная, то каждый субпиксел можно считать отдельным пикселом. Для корректного отображения: определен порядок следования субпикселов в пикселе (красный—зеленый—синий); сгенерированное изображение переведено в полутоновое, т. е. все субпикселы объединены в один пиксел; полутоновое изображение переведено обратно в цветное таким образом, чтобы один пиксел в качестве субпикселов содержал три пиксела полутонового изображения в определенном ранее порядке.

На рис. 7 приведен пример подготовки изображения топологии с минимальной шириной проводников и зазоров 0,15 мм (сформированное из gerber-файла, а, и перекодированное, б, изображения), а также изображение рабочего поля установки, сформированное камерой при отображении на ЖК-матрицу перекодированного изображения (в) и результат экспонирования (г) после проявки (при экспонировании использован фоторезист Ordyl AM 140 толщиной 40 мкм). На перекодированном изображении выделен увеличенный участок, на котором отображено, что в одном цветном пикселе содержатся три отдельных пиксела (см. рис. 7, б).

На изображении с камеры указаны увеличенные участки, полученные с помощью микроскопа (см. рРис. 7, в), которые использованы для визуальной оценки качества сгенерированного шаблона. Точность операции экспонирования на установке зависит от физического размера пиксела на ЖК-матрице. При растеризации топологии возможны ошибки в зонах перехода между прозрачными и затемненными участками (см. рРис. 6, б). Тогда точность воспроизведения проводящего рисунка может быть определена как размер стороны пиксела ($34,6$ мкм) для вертикальных и горизонтальных проводников, а для диагональных проводников — как диагональ пиксела ($48,9$ мкм).

Еще одним элементом подготовки установки прямого экспонирования на основе ЖК-матрицы является процесс совмещения шаблона с заготовкой, который состоит из двух этапов:

— подготовительный этап — калибровка установки, заключающаяся в определении матрицы перехода „камера — ЖК-матрица“ между отображаемым на ЖК-матрице и формируемым камерой изображением; выполнение операции калибровки не требуется при каждом запуске установки, а только в случае изменения положения камеры относительно рабочего поля установки;

— основной этап — позиционирование шаблона на рабочем поле установки на основе информации с камеры о положении заготовки, для которого определяется матрица перехода „ЖК-матрица — заготовка“; осуществляется генерация и отображение изображения проводящего рисунка.

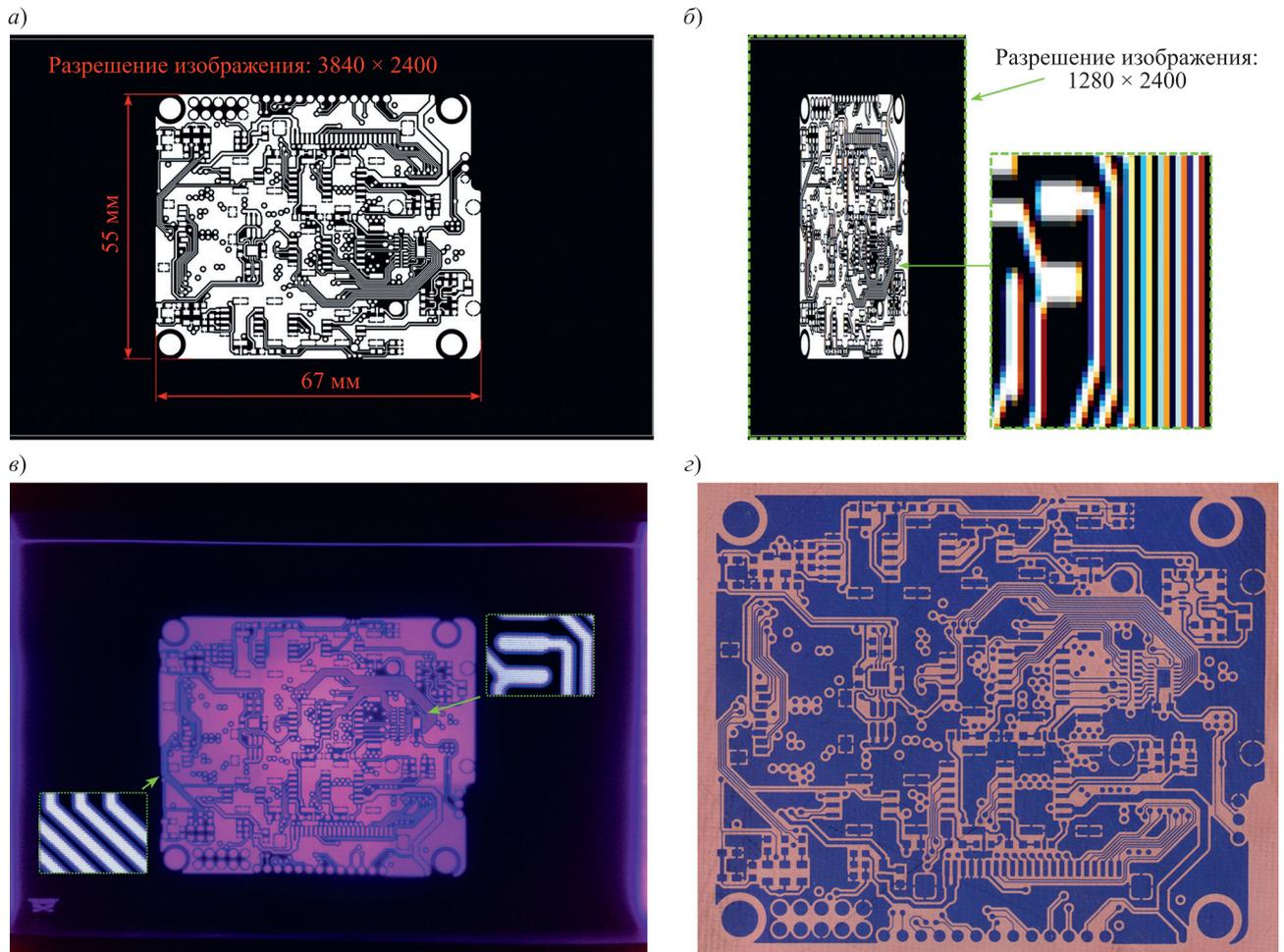


Рис. 7

Изображения до перекодирования (см. рис. 7, а) можно использовать для компьютерного анализа изображений при калибровке и совмещении с применением методов компьютерного зрения и теории распознавания образов, имеющих программную реализацию в наборе модулей OpenCV [21–23].

Алгоритм подготовки к работе установки прямого экспонирования на основе ЖК-матрицы представлен на рис. 8.

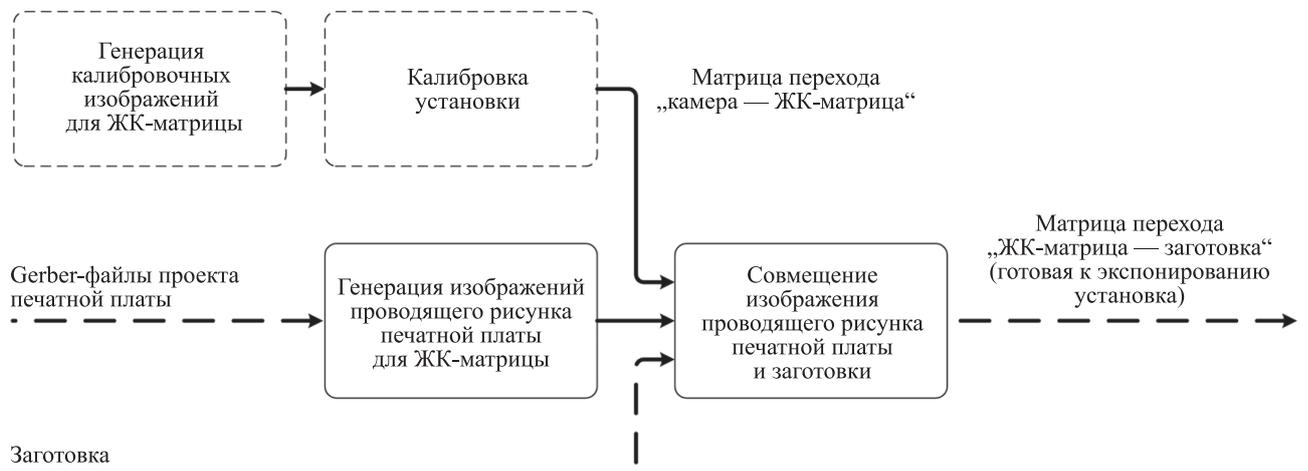


Рис. 8

Таким образом, в разработанный алгоритм подготовки установки к работе возможно включение методов компенсации деформации заготовки на этапе совмещения изображения топологии с заготовкой, что требует более детального рассмотрения этапов калибровки и совмещения: определения их составляющих, а также возможностей и алгоритмов их реализации на лабораторном образце установки.

Заключение. Исследованы возможности использования установки прямого экспонирования на основе ЖК-матрицы для задач компенсации деформации ПП.

1. Рассмотрены способы оценки деформации печатной платы — для компенсации деформации ПП на этапе экспонирования наиболее применим подход, основанный на методе контроля совмещаемости топологических слоев. Метод предполагает определение матрицы перехода на основе сопоставления эталона и изображения заготовки в процессе производства. Для проверки работоспособности подхода предложено использовать в качестве реперных знаков отверстия на ПП и ограничить математическую модель деформации аффинными преобразованиями без проекционных искажений.

2. Произведена аппаратная модернизация установки прямого экспонирования — внедрен контур обратной связи на основе системы перемещения 3D-принтера Anycubic Photon и камеры Sony IMX298.

3. Определен 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 камеры, совмещение изображения проводящего рисунка и заготовки. Разработан алгоритм генерации изображений, а также проведено его тестирование путем переноса на фоторезист проводящего рисунка с минимальными размерами проводника и зазора 0,15 мм.

Также в ходе исследования определена необходимость в разработке и программной реализации двух этапов: калибровки — для определения связи между формируемыми камерой и отображаемыми на ЖК-матрице изображениями; совмещения — для определения необходимого преобразования отображаемого на ЖК-матрице изображения в соответствии с положением заготовки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Vasilyev F. V., Medvedev A. M., Barakovskiy F. A., Korobkov M. A.* Development of the Digital Site for Chemical Processes in the Manufacturing of Printed Circuit Boards // *Inventions*. 2021. N 6 (3). P. 48. DOI: 10.3390/inventions6030048.
2. *Баракковский Ф., Ванцов С., Васильев Ф.* Струйный метод получения проводящего рисунка печатной платы // *Электроника: Наука, технология, бизнес*. 2020. № 3 (194). С. 108–113.
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. *Бегер Е.* Практические способы уменьшения деформаций печатных плат на этапе конструирования // *Компоненты и технологии*. 2009. № 1. С. 116–119.
5. *Ванцов С., Хомутская О., Лийн Е.* Влияние конструктивных параметров на плоскую деформацию печатных плат // *Электроника: Наука, технология, бизнес*. 2023. № 8 (229). С. 108–113.
6. *Никитин С., Поздняков К., Хомутская О.* Оценка деформации печатных плат // *Производственные технологии*. 2019. № 5. С. 144–150.
7. *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 // *Proc. – ICOECS 2021: Intern. Conf. on Electrotechnical Complexes and Systems*. 2021. P. 510–512. DOI: 10.1109/ICOECS52783.2021.9657420.
8. *Васильев Ф. В.* Физическая надежность электроники. М.: МАИ, 2022. 160 с.
9. *Платы печатные: Справочник / Под ред. К. Ф. Кумбза.* М.: Техносфера, 2011. Кн. 1. 1016 с.
10. *Коробков М. А., Зайкин В. Д., Маревичев Е. С., Хомутская О. В., Васильев Ф. В.* Система прямого экспонирования на основе жидкокристаллической матрицы // *Научное приборостроение*. 2023. № 33 (1). С. 65–85.
11. *Коробков М. А., Зайкин В. Д.* Метод масочной компенсации неравномерности излучения в системе прямого экспонирования на основе жидкокристаллической матрицы // *Тр. МАИ*. 2023. № 132.

12. Крылов С. А., Медведев А. М., Сержантов А. М. Развитие технологии межсоединений универсальных высокопроизводительных ЭВМ // Вопросы радиоэлектроники. Серия ЭВТ. 1989. № 7. С. 9–19.
13. Медведев А. М. Технологическое обеспечение надежности соединений в печатных платах // Технологии в электронной промышленности. 2005. № 6 (6). С. 48–51.
14. Иевлев В. И. Анализ точности производства электронных средств: Учеб. пособие. Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2010. 103 с.
15. Цветков Ю. Б. Управление топологической точностью фотолитографии: Учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. 174 с.
16. Можаров В. А. Математическая модель пространственного совмещения элементов межсоединений в многослойных структурах авионики // Тр. МАИ. 2013. № 65. С. 36.
17. Можаров В. А. Обеспечение пространственного совмещения элементов межсоединений в многослойных печатных структурах: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2013.
18. Хомутская О. В. Разработка методики и алгоритмов автоматизированной оценки деформации в многослойных печатных структурах: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2019.
19. Chen I.-C., Hwang R.-C., Huang H.-C. PCB Defect Detection Based on Deep Learning Algorithm // Processes. 2023. N 11. P. 775. DOI: 10.3390/pr11030775.
20. Набор программных модулей pcb-tools 0.1.6. [Электронный ресурс]: <https://pypi.org/project/pcb-tools/>, 01.03.2024.
21. 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.
22. 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.
23. 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.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Максим Андреевич Коробков

— аспирант; Московский авиационный институт, кафедра цифровых технологий и информационных систем; ст. преподаватель;
E-mail: josef_turok@bk.ru

Поступила в редакцию 22.03.2024; одобрена после рецензирования 11.04.2024; принята к публикации 16.05.2024.

REFERENCES

1. Vasilyev F.V., Medvedev A.M., Barakovskiy F.A., Korobkov M.A. *Inventions*, 2021, no. 3(6), pp. 48, DOI: 10.3390/inventions6030048.
2. Barakovskiy F., Vantsov S., Vasiliev F. *Electronics: Science, Technology, Business*, 2020, no. 3(194), pp. 108–113. (in Russ.)
3. Medvedev A.M., Sokolsky A.M. *Sbornik v mashinostroyenii, priborostroyenii*, 2015, no. 11, pp. 41–44. (in Russ.)
4. Beger E. *Printed Circuits Handbook*, 2009, no. 1, pp. 116–119. (in Russ.)
5. Vantsov S., Khomutskaya O., Liin E. *Electronics: Science, Technology, Business*, 2023, no. 8(229), pp. 108–113. (in Russ.)
6. Nikitin S., Pozdnyakov K., Khomutskaya O. *Proizvodstvennyye tekhnologii*, 2019, no. 5, pp. 144–150. (in Russ.)
7. Khomutskaya O.V., Medvedev A.M., Korobkov M.A., Vancov S.V. *Proceedings – ICOECS 2021: 2021 Intern. Conf. on Electrotechnical Complexes and Systems*, 2021, pp. 510–512, DOI: 10.1109/ICOECS52783.2021.9657420.
8. Vasiliev F.V. *Fizicheskaya nadezhnost' elektroniki* (Physical Reliability of Electronics), Moscow, 2022, 160 p. (in Russ.)
9. Coombs C.F. *Printed Circuits Handbook*, McGraw-Hill Companies, 2008.
10. Korobkov M.A., Zaikin V.D., Mareichev E.S., Khomutskaya O.V., Vasiliev F.V. *Nauchnoe Priborostroyenie* (Scientific Instrumentation), 2023, no. 1(33), pp. 65–85. (in Russ.)
11. Korobkov M.A., Zajkin V.D. *Trudy MAI*, 2023, no. 132. (in Russ.)
12. Krylov S.A., Medvedev A.M., Serzhantov A.M. *Voprosy radioelektroniki. Seriya EVT*, 1989, no. 7, pp. 9–19. (in Russ.)
13. Medvedev A.M. *Tekhnologii v elektronnoy promyshlennosti*, 2005, no. 6 (6), pp. 48–51 (in Russ.)
14. Ievlev V.I. *Analiz tochnosti proizvodstva elektronnykh sredstv* (Analysis of the Accuracy of Electronic Production), Ekaterinburg, 2010, 103 p. (in Russ.)
15. Tsvetkov Yu.B. *Upravleniye topologicheskoy tochnost'yu fotolitografii* (Control of Topological Accuracy of Photolithography), Moscow, 2005, 174 p. (in Russ.)
16. Mozharov V.A. *Trudy MAI*, 2013, no. 65, pp. 36. (in Russ.)

17. Mozharov V.A. *Obespecheniye prostranstvennogo sovmeshcheniya elementov mezhsoyedineniy v mnogosloynnykh pechatnykh strukturakh* (Ensuring Spatial Alignment of Interconnection Elements in Multilayer Printed Structures), Candidate's thesis, Moscow, 2013, 149 p. (in Russ.)
18. Khomutskaya O.V. *Razrabotka metodiki i algoritmov avtomatizirovannoy otsenki deformatsii v mnogosloynnykh pechatnykh strukturakh* (Development of Methods and Algorithms for Automated Assessment of Deformation in Multilayer Printed Structures), Candidate's thesis, Moscow, 2019. (in Russ.)
19. Chen I.-C., Hwang R.-C., Huang H.-C. *Processes*, 2023, no. 11, pp. 775, <https://doi.org/10.3390/pr11030775>.
20. <https://pypi.org/project/pcb-tools/>. (in Russ.)
21. Maximov N., Skleymin Yu., Sharonov A. *Aerospace MAI Journal*, 2016, no. 3(23), pp. 102–111. (in Russ.)
22. Maximov N., Malyuta E., Sharonov A. *Aerospace MAI Journal*, 2015, no. 4(22), pp. 85–90. (in Russ.)
23. Maximov A.N., Alexandrov A.A., Romanov V.D. *Scientific and Technical Volga Region Bulletin*, 2022, no. 4, pp. 96–98. (in Russ.)

DATA ON AUTHOR

Maksim A. Korobkov

— Post-Graduate Student; Moscow Aviation Institute, Department of Digital Technologies and Information Systems; Senior Lecturer;
E-mail: josef_turok@bk.ru

Received 27.11.2023; approved after reviewing 14.12.2023; accepted for publication 16.05.2024