

Для цитирования: Алешкин Н. А., Петрушевская А. А., Карпова И. Р. Методика повышения результативности производственного процесса изготовления электроники с применением концепции Design for Manufacturing // Вопросы радиоэлектроники. 2019. № 1. С. 51–56.  
DOI 10.21778/2218-5453-2019-1-51-56  
УДК 658.51

**Н. А. Алешкин<sup>1</sup>, А. А. Петрушевская<sup>1</sup>, И. Р. Карпова<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,

<sup>2</sup> АО «Научно-производственное предприятие «Радар ммс»

# МЕТОДИКА ПОВЫШЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОНИКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ КОНЦЕПЦИИ DESIGN FOR MANUFACTURING

*В статье рассматривается возможность применения принципов концепции «Индустрия 4.0» при изготовлении электроники с внедрением концепции Design for Manufacturing (DFM) в среде компьютерной математики MatLab с целью повышения результативности производственного процесса. Технологические процессы могут быть описаны в виде математических моделей, построенных с применением аппарата цепей Маркова. На основе разработанной модели получены результаты, подтверждающие эффективность использования графов при управлении технологическими операциями. По результатам выпуска каждой промышленной партии, в случае отклонения от заданных значений будет выполнена оценка несоответствия и произведены корректирующие мероприятия. Предложенная в статье методика позволит эффективно использовать имеющиеся у предприятия ресурсы, исключая как потерю непрерывности и устойчивости управления производственным процессом изготовления электроники, так и отклонения качественных характеристик изготавливаемого изделия от норм.*

**Ключевые слова:** цифровое производство, технологический процесс, электроника, математическое моделирование, управление качеством

## Введение

Получение достоверной информации в процессе производства и монтажа электронных компонентов и ее оперативная обработка – основа современного управления. Соответственно, качественные характеристики изготавливаемой продукции в значительной степени будут определяться результативностью управления технологическими процессами (ТП). Задачи повышения результативности ТП изготовления электронных компонентов и увеличения процента выхода годных изделий может быть решена путем адаптации принципов концепции «Индустрия 4.0» на всех этапах жизненного цикла продукции (ЖЦП), а также моделирования рассматриваемых этапов ЖЦП с помощью цепей Маркова. Обеспечение качества достигается совершенствованием характеристик оборудования, однако влияние человеческого фактора и отсутствие учета взаимодействия частей технологической линии остаются факторами неопределенности производственного процесса.

В условиях когда требования к результативности ТП непрерывно повышаются, изготовление и монтаж электронных компонентов труднореализуемы без применения технологических инноваций [1]. Внедрение элементов концепции «Индустрия 4.0» открыло новые возможности для роста результативности ТП изготовления электронной продукции на основе все более полной цифровизации производства.

Принимая во внимание мировые тенденции к интеллектуализации ТП изготовления электроники, предлагается внедрять элементы концепции «Индустрия 4.0» поэтапно, на основе анализа средств и процессов производства в рамках структурного, функционального и информационного описаний.

**Методика повышения результативности производственного процесса изготовления электроники с применением концепции DFM**

Требуемая функциональная организация и возможности ее наращивания за счет технологических

инноваций определяют основу для выбора структуры линии автоматического монтажа электронной продукции. Ключевым фактором для формирования конкурентоспособного производства в условиях минимизации затрат является техническое переоснащение за счет внедрения программно-аппаратных средств. Процесс переоснащения производства должен протекать непрерывно с постоянной «обратной связью», то есть после внедрения технологической инновации происходит переход на этап мониторинга состояния ТП.

Для реализации такого элемента концепции «Индустрия 4.0», как Интернет вещей, необходимо формирование базы данных предприятия, содержащей детальную статистическую информацию о состоянии производственных процессов на всех этапах от закупки комплектующих до отгрузки продукции заказчику.

В ТП возникают различные непрогнозируемые возмущения, которые неизбежно приводят к ряду отклонений от технических характеристик продукции и классифицируются как дефекты. Концепция DFM используется в процессе определения комплекса превентивных мероприятий для минимизации уровня риска выхода некачественной продукции и сокращения влияния непрогнозируемых возмущений на ТП. Инструменты DFM обеспечивают устранение отклонений в соответствии с требованиями стандартов IPC в ходе этого процесса.

С целью формирования базы данных ТП изготовления электроники необходима детальная расшифровка основных видов возмущений и неопределенностей, возникающих на каждой стадии ТП. Следует заметить, что сформированная база данных не изменяет риск возникновения возмущений, но способствует принятию решений, которые положительно влияют на характеристики ТП, адаптивно изменяя воздействие на исполнительные устройства.

Для разработки методики повышения результативности ТП предлагается использовать декомпозицию ТП с помощью аппарата марковских цепей, оптимально отражающего процент выхода годных изделий (рис. 1), с применением среды компьютерного моделирования MatLab.

Виды ТП поэтапной разработки и автоматизации цифрового изготовления электроники рассмотрены в [2–4]. ТП изготовления электроники могут быть детализированы до уровня простейших операций, однако, предлагается рассматривать только основные процессы, протекающие на линии автоматического монтажа. В табл. 1 представлены основные ТП и обозначены вероятности достижения заданных технологической и нормативной документацией состояний процессов.

Для реализации предлагаемой методики вероятность перехода из предыдущего состояния  $i$  в последующее состояние  $j$  рассматривается как  $P_{ij}$ . При отклонении характеристик текущих значений электронных компонентов от заданных вероятность перехода в состояние несоответствующей продукции (*fail*) будет представлена как  $P_{fi}$ .

Вероятности перехода задаются матрицей:

$$S(0) = S1 \Rightarrow P_1(0) = 1, P_i(\emptyset) = 0, i = \overline{2,7}, f$$

$$P = \begin{bmatrix} 0 & P_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{1f} \\ 0 & 0 & P_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{2f} \\ 0 & 0 & 0 & P_{34} & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{3f} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & P_{45} & 0 & 0 & 0 & P_{4f} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{56} & 0 & 0 & P_{5f} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{67} & 0 & P_{6f} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{78} & P_{7f} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{8f} \\ P_{f1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Таблица 1. Основные процессы автоматического монтажа электронных компонентов и вероятности достижения заданных состояний

№	Описание процесса	Вероятность состояния
1	Разработка принципиальной электронной схемы	$P_1$
2	Проектирование и коррекция топологии печатной платы в соответствии с требованиями стандартов IPC	$P_2$
3	Изготовление печатных плат	$P_3$
4	Печать и осмотр паяльной пасты	$P_4$
5	Установка компонентов	$P_5$
6	Оплавление в печи	$P_6$
7	Лазерная маркировка	$P_7$
8	Автоматический оптический контроль	$P_8$
$f_i$	Состояние несоответствия	$P_{fi}$

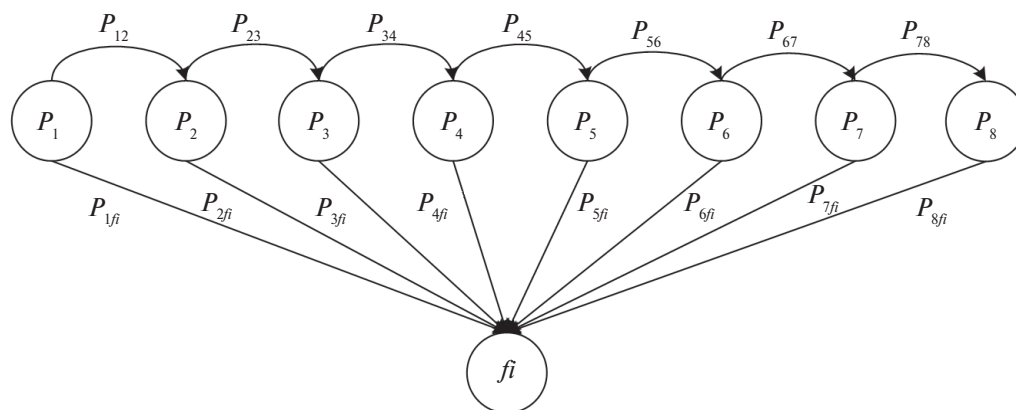


Рисунок 1. Графы вероятностей перехода ТП от этапа разработки до изготовления электроники

Если  $P_i(\emptyset) = 0$ , то на графе перехода нет  $(i = \overline{1,7}, f = \overline{1,7})$ .

Выбор теории графов для математического моделирования при возможностях детализации моделируемого объекта и обеспечения полной взаимосвязи компонентов изделия имеет своей целью недопущение выпуска брака и, соответственно, повышение качества изготавливаемой продукции.

Для оценки результативности ТП производства и построения прогнозных значений выхода годных изделий через  $n$  партий в среде компьютерного моделирования MatLab разработана программа вычисления вероятностей процента выхода годных при заданных предельных вероятностях. При написании программного обеспечения были заданы значения вероятностной функции (*QualityProbability*), выбранной из пакета прикладных функций.

Функция *QualityProbability* представлена тремя параметрами:

- *reqProb* – нижний порог процента выхода годных;
- *nChainUnits* – число звеньев производственной цепочки;
- *nIterations* – количество повторений вычислений процента одной цепочки, где одна итерация соответствует вычислению переходов процентов между всеми звеньями одной цепочки  $functionAvgProb = QualityProbability(reqProb, nChainUnits, nIterations)$ .

Начальное значение суммы вероятностей каждой цепочки  $Sum = 0$ .

Выполним цикл вычислений вероятности максимальных значений по показателю «выход годных»:  $for i = 1: nIterations$  (начальное значение вероятности в одной цепочке). При дальнейших вычислениях начальное значение вероятности каждого последующего этапа получено путем умножения прошедшего на случайную величину интервала. Перед

началом вычислений вероятностной функции присвоено значение 1:  $QualityProb = 1$ .

Цикл вычислений одной цепочки состоит из  $nChainUnits$  звеньев:

$for j = 1:(nChainUnits-1)$ .

На каждом шаге вычислим вероятность отсутствия брака при переходе к следующему звену производственной цепочки. Например, для нижнего порога 0,98 и восьми звеньев на каждом шаге осуществляется умножение на случайную величину в интервале  $[0,98^{1/7}; 1]$ , то есть  $[0,9966; 1]$ :

```
QualityProb=QualityProb*(realpow(reqProb;1/
(nChainUnits-1))+rand(1;1)*(1-realpow(reqProb;1/
(nChainUnits-1)))));
end.
```

Текущее значение суммы вероятностей увеличивается на вероятность получения качественной продукции в рассмотренной цепочке:

```
Sum = Sum + QualityProb;
end.
```

Среднее значение определяется делением текущего значения суммы вероятностей на число итераций:

```
AvgProb = Sum/nIterations.
```

С помощью разработанной программы были получены значения вероятностей перехода (табл. 2).

На рис. 2 и 3 проиллюстрирована процедура определения процента выхода годных изделий в зависимости от рассматриваемых партий. Так, при изготовлении первой партии продукции выход годных изделий будет равен 0,9896, при изготовлении пятой партии выход годных изделий будет равен 0,9992, при изготовлении десятой – 0,9900, при изготовлении шестьдесят пятой – 0,9901 и т.д.

Таблица 2. Значения вероятностей перехода для восьми звеньев

1-я партия	10-я партия	50-я партия	100-я партия
>>QualityProbability (0,98;8;1) ans = 0,9885	>>QualityProbability (0,98;8;10) ans = 0,9899	>>QualityProbability (0,98;8;50) ans = 0,9902	>>QualityProbability (0,98;8;100) ans = 0,9900

Полученные данные свидетельствуют об увеличении процента выхода годных изделий в условиях наращивания производственных мощностей и увеличения числа промышленных партий. По результатам выпуска каждой промышленной партии, в случае отклонения от заданных пределов будет выполнена оценка несоответствия и произведены корректирующие мероприятия для его устранения.

Для повышения результативности ТП при изготовлении электроники необходимо применение инструментария, позволяющего оптимизировать процесс выявления отклонений от нормы на каждом этапе производственного цикла и, соответственно, приблизить процесс управления параметрами ТП к интеллектуальному за счет превентивных процедур, моделей, использующих аппарат удаленного

(выносного) мониторинга, идентификации процессов при возникновении в возмущенной окружающей среде признаков критического состояния и т.п. [5, 6]. Таким инструментом выбран DFM-анализ, реализация которого на всех этапах ЖЦП позволяет корректировать возникающие незначительные отклонения от требуемых значений в ТП изготовления продукции на самой ранней стадии обнаружения несоответствия.

DFM-анализ проводится по запросу клиента перед подготовкой файлов плат для производства (на этапе запроса) так, чтобы у клиента оставалось время внести корректировки в файлы. В процессе анализа выявляются несоответствия между платой и спецификацией (лишние компоненты в спецификации, несоответствие корпуса

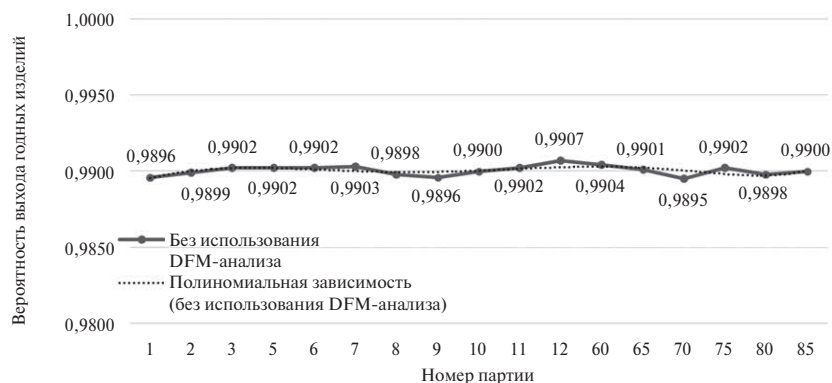


Рисунок 2. Зависимость вероятностей выхода годных изделий от номера партии

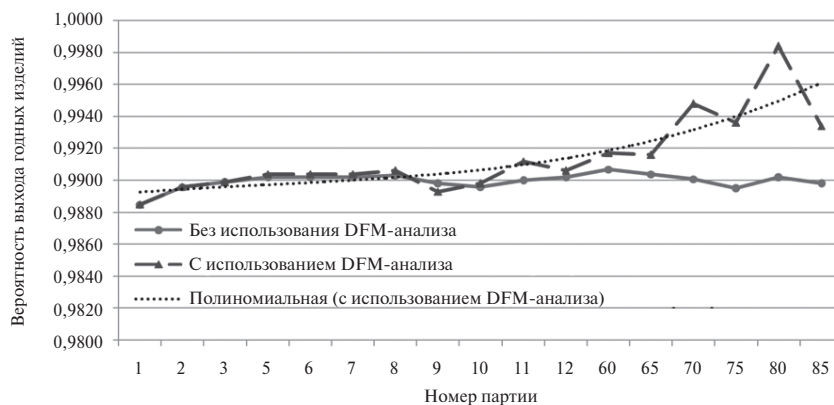


Рисунок 3. Зависимость вероятностей выхода годных изделий от номера партии

компонента посадочному месту на плате и пр.). Несоответствия выявляются в проекте, а не на готовых платах, что позволяет значительно уменьшить время запуска блоков в производство, снизить материальные затраты и избежать ручной допайки блоков.

Проверка проходит с учетом требований IPC и возможностей конкретного производства. В результате анализа клиент получает отчет о всех выявленных несоответствиях.

Следует заметить, что DFM-анализ может применяться для всех видов ТП изготовления различных электронных изделий, а явные преимущества от использования технологии DFM наблюдаются в условиях производства изделий, состоящих из многономенклатурных электронных компонентов.

На рис. 3 представлена зависимость вероятностей выхода годных изделий от номера партии с использованием и без использования DFM-анализа. Из графиков зависимостей следует, что при применении DFM-анализа в процессе изготовления электроники процент выхода годных изделий с каждой партией увеличивается, что доказывает

целесообразность использования данного аппарата в производственном процессе.

В результате оптимизации поиска решений по повышению процента выхода годных изделий с применением принципов концепции «Индустрия 4.0» можно сделать вывод о том, что разработанные программно-алгоритмические решения, как показало моделирование, позволяют положительно влиять на характеристики ТП. Адаптивно изменяя воздействие на исполнительные устройства, можно сократить сроки подготовки и гарантированно выполнить обязательства перед заказчиками по качеству изделий.

### Вывод

Предложенная методика повышения результативности производственного процесса изготовления электроники с применением концепции DFM позволит эффективно использовать имеющиеся у предприятия ресурсы, исключая как потерю непрерывности и устойчивости управления, так и отклонения качественных характеристик изготавливаемого изделия от норм.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балашов В. М., Морозов С. А., Смирнова М. С. Управление производственно-технологическими комплексами в условиях неопределенности // Вопросы радиоэлектроники. 2016. № 2. С. 86–89.
2. Балашов В. М., Коршунов Г. И., Поляков С. Л. Оценка эффективности технологической модернизации сборочно-монтажного производства РЭА // Вопросы радиоэлектроники. 2013. № 2. С. 100–109.
3. Коршунов Г. И., Петрушевская А. А. Повышение результативности производства электроники для инновационных автомобильных систем на принципах «Индустрии 4.0» // Инновации. 2017. С. 13–16.
4. Липкин Е. Б. Индустрия 4.0 – потенциальный стимул развития отечественной радиоэлектронной промышленности // Вектор. 2017. № 5. С. 10–14.
5. Черняк Л. Киберфизические системы на старте // Открытые системы. СУБД. 2014. № 2. С. 10–13.
6. Orshansky M., Nassif S., Boning D. Design for manufacturability and statistical design: a constructive approach. New York: Springer, 2008. 314 p.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Алешкин Никита Андреевич**, к.т.н., старший преподаватель, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» (ГУАП), 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А, тел.: 8 (921) 892-58-57, e-mail: ales\_nikita@mail.ru.

**Петрушевская Анастасия Андреевна**, аспирант, ведущий специалист центра координации научных исследований, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» (ГУАП), 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А, тел.: 8 (911) 844-30-44, e-mail: a.petra.ip@gmail.com.

**Карпова Ирина Руслановна**, к.т.н., доцент, начальник отдела, АО «НПП «Радар ммс», Российская Федерация, 197375, Санкт-Петербург, ул. Новосельковская, д. 37, лит. А, тел.: 8 (812) 600-04-54, e-mail: karpova\_ir@radar-mms.com.

*For citation: Aleshkin N. A., Petrushevskaya A. A., Karpova I. R. Methods of improving efficiency of production process of electronics manufacturing using design for manufacturing concept. Voprosy radioelektroniki, 2019, no. 1, pp. 51–56. DOI 10.21778/2218-5453-2019-1-51-56*

**N. A. Aleshkin, A. A. Petrushevskaya, I. R. Karpova**

## METHODS OF IMPROVING EFFICIENCY OF PRODUCTION PROCESS OF ELECTRONICS MANUFACTURING USING DESIGN FOR MANUFACTURING CONCEPT

The article discusses the possibility applying the principles of the concept of industry 4.0 in the electronics manufacture with the introduction of Design for Manufacturing concept in an environment of computer mathematics MatLab with the efficiency increasing aim of the production process. Technological processes can be described in the form of mathematical models built with the use of Markov chains. On the basis of the developed model, the results effectiveness confirming with the use of graphs

in the management technological operations are obtained. According to the launch results of each industrial batch, in deviation case from the specified limits, the non-conformity assessment will be carried out and corrective measures will be taken for the non-compliance. The method proposed in the article will make it possible to effectively use the resources available to the enterprise, excluding both the loss of continuity and control production process stability of electronics manufacturing, and the quality characteristics abnormal loss of the manufactured product.

**Keywords:** digital production, technological process, electronics, mathematical modeling, quality management

## REFERENCES

1. Balashov V. M., Morozov S. A., Smirnova M. S. Production-and-technological complexes management under conditions of uncertainty. *Voprosy radioelektroniki*, 2016, no. 2, pp. 86–89. (In Russian).
2. Korshunov G. I., Balashov V. M., Polyakov S. L. Evaluation of efficiency of technological modernization of radio electronic equipment assembly production. *Voprosy radioelektroniki*, 2013, no. 2, pp. 100–109. (In Russian).
3. Korshunov G. I., Petrushevskaya A. A. Improving the efficiency of production of electronics for innovative automotive systems on the principles of Industry 4.0. *Innovations*, 2017, pp. 13–16. (In Russian).
4. Lipkin E. B. Industry 4.0 – a potential stimulus for the development of the domestic electronic industry. *Vector*, 2017, no. 5, pp. 10–14. (In Russian).
5. Chernyak L. Cyberphysical systems at the start. *Otkrytye sistemy. SUBD*, 2014, no. 2, pp. 10–13. (In Russian).
6. Orshansky M., Nassif S., Boning D. *Design for manufacturability and statistical design: a constructive approach*. New York, Springer, 2008, 314 p.

## AUTHORS

**Aleshkin Nikita**, Ph. D., senior tutor of department, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67A, Bolshaya Morskaya St., Saint-Petersburg, 190000, Russian Federation, tel.: +7 (921) 892-58-57, e-mail: ales\_nikita@mail.ru.

**Petrushevskaya Anastasia**, post-graduate student, leading specialist of the center for coordination of scientific research, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67A, Bolshaya Morskaya St., Saint-Petersburg, 190000, Russian Federation, tel.: +7 (911) 844-30-44, e-mail: a.petra.ip@gmail.com.

**Karpova Irina**, Ph. D., associate professor, head of department, «NPP «Radar mms» JSC, 37A, Novoselkovskaya St., Saint-Petersburg, 197375, Russian Federation, tel.: +7 (812) 600-04-54, e-mail: karpova\_ir@radar-mms.com.