

## ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА МОНТАЖА ЭЛЕКТРОРАДИОЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ ВЕРОЯТНОСТНЫХ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ КОНТРОЛЬНЫХ ОПЕРАЦИЙ

Предложена модель вариантов технологического процесса в виде конечного направленного графа, позволяющая найти оптимальный процесс с учетом динамики распределений вероятностей дефектов в изделиях и связанных с этим приведенных стоимостных затрат. Применение предложенных моделей проиллюстрировано компьютерным расчетом оптимизации фрагмента технологического процесса изготовления платы преобразователя.

**Ключевые слова:** технологический процесс, технологическая операция, контрольная операция, граф, моделирование, приведенная себестоимость.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Среди целей оптимизации технологических процессов (ТП), таких как сокращение времени технологического цикла, повышение коэффициента загрузки оборудования и других актуальными являются вопросы снижения себестоимости изготовления во взаимосвязи с качеством продукции.

Традиционный подход к оптимизации ТП [1] сводится к его представлению в виде последовательности технологических операций (ТО), то есть операций, в ходе которых формируются потребительские свойства изделия. Каждая ТО характеризуется прямыми приведенными затратами на ее реализацию в расчете на одно изделие:

$$Z_i = C_{Ti} + C_{oi} = t_i \cdot C'_{Ti} + E \cdot k_{Ti}, \quad (1)$$

где  $C_{Ti}$ ,  $C_{oi}$  – стоимость труда и оборудования для  $i$ -ой ТО, соответственно;  $t_i$  – время выполнения  $i$ -ой ТО;  $C'_{Ti}$  – тарифная ставка;  $E$  – нормативный коэффициент окупаемости оборудования;  $k_{Ti}$  – удельные капитальные затраты для  $i$ -ой ТО.

Если имеются варианты реализации ТО, отличающиеся, например, по затратам  $k_{Ti}$  или времени  $t_i$ , то варианты ТП представим в виде направленного графа, вершины которого соответствуют этапам, а дуги – вариантам ТО ТП. Причем длина дуги характеризует затраты на операцию, а каждый вариант ТП, состоящий из  $k$  операций, представляет путь  $\mu$  из начальной вершины в конечную с затратами:

$$Z_\mu = \sum_{i=1}^k Z_{i\mu}, \quad (2)$$

где  $Z_\mu$  – затраты  $Z_i$  для  $\mu$ -го варианта ТП. Оптимальным называют такой ТП, которому соответствует путь  $\mu^*$  с затратами:

$$Z_\mu^* = \min Z_\mu. \quad (3)$$

То есть задача оптимизации ТП сводится к нахождению кратчайшего пути в направленном графе вариантов ТП.

### АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРЕДЫДУЩИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Известен подход к оптимизации ТП [2], при котором в нем выделяются необязательные, как правило, контрольные операции (КО) и принимаются решения о включении этих операций в ТП только при наличии определенной вероятности дефектов в изделиях. Пример такого ТП – процесс монтажа электрорадиоэлементов (ЭРЭ) на печатную плату, включающий КО входного контроля ЭРЭ, качества пайки, правильности монтажа и функционирования. В качестве критерия оптимизации используется (3), при этом исключенные операции соответствуют дугам с  $Z_{i\mu} = 0$ .

Данный подход не учитывает различий в качестве продукции, изготовленной по различным вариантам ТП, если на выходном контроле не гарантируется обнаружение всех дефектов, а также коррекцию качества изделий по результатам КО, модели которой описаны в [3].

**Цель исследования** – повышение качества оптимизации ТП за счет учета в критерии оптимизации переходов коррекции качества изделия в ходе КО и вероятных затрат на устранение производственных дефектов на последующих этапах производства или эксплуатации изделия.

### ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Для выбора оптимального ТП представим варианты ТП в виде направленного графа (рис. 1). Каждая вершина графа, за исключением конечной  $S_k$ , представляет

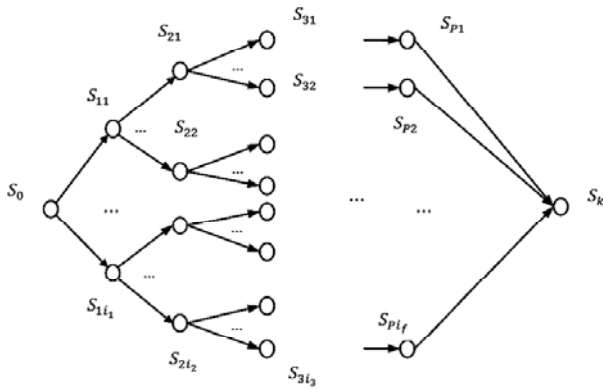


Рис. 1. Грaф варіантів ТП

состояние ТП, то есть степень готовности изделия, распределение вероятностей количества  $l_m$  дефектов  $Q_m^\alpha(l_m)$   $m$ -го вида ( $m = \overline{1, M}$ ) [3] в изделии, вероятность годности  $P_i^\alpha$ , удельные затраты на  $z_i^\alpha$  по данному ТП. Конечная вершина  $S_k$  представляет состояние в пределах жизненного цикла изделия, в котором обнаружены и устранены все производственные дефекты. Группа вершин с одинаковым рангом характеризует разные варианты ТП с одинаковой степенью готовности изделия, но различными распределениями  $Q_m^\alpha(l_m)$  и затратами  $z_i^\alpha$ . Например, вершины первого ранга  $S_{11}$  и  $S_{12}$  соответствуют степени готовности «входной контроль ЭРЭ проведен», но разными методами: внешним осмотром, автоматическим контролем электрических характеристик в широком диапазоне температур.

Вероятность годности  $P_i^\alpha$  представляет долю изделий исходной совокупности, которые не были забракованы к данному этапу ТП. В результате браковки изделий операций на различных этапах ТП выполняются над различным числом объектов, что влияет на затраты  $z_i^\alpha$ . Для обеспечения сопоставимости затрат пересчитаем их к единице продукции, признанной годной:  $\frac{z_i^\alpha}{P_i^\alpha}$ .

Оценим влияние отдельной операции на состояние ТП. Для оценки степени влияния ТО и КО на качество изделия воспользуемся моделями этих операций, предложенными в [3]. Так для ТО инцидентной вершинам  $S_\alpha$  и  $S_p$  графа вариантов ТП (рис. 1):

$$Q_m^\beta(l_m) = \sum_{l'_m=0}^{l_m=L_m} (Q_m^\alpha(l'_m) \cdot U_{mi}(l_m - l'_m)), l_m = \overline{0, L_m}, \quad (4)$$

$$P_i^\beta = P_i^\alpha, \quad (5)$$

$$z_i^\beta = z_i^\alpha + z_i, \quad (6)$$

где  $U_{mi}$  – вероятность внесения в изделие в ходе  $i$ -ой ТО ровно  $l_m$  дефектов  $m$ -го вида;  $L_m$  – максимальное коли-

чество дефектов  $m$ -го вида в изделии. Формула (5) учитывает тот факт, что браковка изделия выполняется только в ходе КО. Для вершины  $S_0$ ,  $P_i^\alpha = 1$ . Затраты  $z_i$  на реализацию ТО определим по формуле (1).

Для КО инцидентной вершинам  $S_\alpha$  и  $S_\beta$  графа вариантов ТП (рис. 1):

$$Q_m^\beta(l_m) = \begin{cases} Q_m^\alpha(0) + (1 - P_{nm}) \sum_{l'_m=1}^{L_m} Q_m^\alpha(l'_m), l_m = 0 \\ Q_m^\alpha(l_m) \cdot P_{nm}, 0 < l_m < L_m \end{cases}, \quad (7)$$

$$P_i^\beta = P_i^\alpha \cdot P_{Gi}, \quad (8)$$

где  $P_{nm}$  – вероятность необнаружения  $m$ -го в ходе КО;  $P_{Gi}$  – вероятность того, что изделия, поступившие на контроль, будут признаны годными (допущенными к следующей операции) в ходе  $i$ -ой КО.

Приведенные удельные затраты на реализацию КО определим по формуле:

$$z_i = z_{ik} + \sum_{m \in M_i} z_{Bm} \cdot L_{Bm} \cdot P_{Bi} + C_{Bi} \cdot Q_{Bi}, \quad (9)$$

где  $z_{ik}$  – приведенные удельные затраты на контроль в ходе  $i$ -ой КО;  $L_{Bm}$  – количество дефектов  $m$ -го вида в изделии устраненных в ходе КО;  $z_{Bm}$  – затраты на устранение одного дефекта  $m$ -го вида в изделии;  $P_{Bi}$  – вероятность попадания изделий, поступивших на  $i$ -ю КО в число восстановленных в ходе  $i$ -ой КО;  $C_{Bi}$  – стоимость бракованного в ходе  $i$ -ой КО изделия;  $Q_{Bi}$  – вероятность попадания изделий, поступивших на  $i$ -ю КО в число бракованных;  $M_i$  – множество характеристик изделия контролируемых в ходе КО.

Последовательно применяя формулы (4)–(9) на пути  $\mu_i$  из  $S_0$  в  $S_{pfi}$ , получим затраты  $z_i^f$ , распределения  $Q_m^f(l_m)$ ,  $m = \overline{1, M}$  и вероятность  $P_i^f$ . На основании этих оценок найдем удельные приведенные затраты:

$$z_\mu = \frac{z_i^f}{P_i^f} + \sum_{m=1}^M C_{om} \cdot \sum_{l_m=1}^{L_m} Q_m^f(l_m) \cdot l_m, \quad (10)$$

где  $C_{om}$  – затраты на обнаружение и устранение одного производственного дефекта  $m$ -го вида на последующих этапах жизненного цикла. Оптимальный путь  $\mu^*$  определим по критерию (3), сравнивая затраты  $z_\mu$  для всех путей в графе вариантов ТП.

Потенциально граф вариантов ТП может иметь большое количество вершин ранга  $f$ . Реально имеется два – три варианта ТО, которые ранжированы по отношению качество/стоимость. Типичные варианты «дешево, но не качественно» и «качественно, но дорого». Для КО реаль-

ное количество вариантов два – четыре: отсутствие контроля, ручной контроль («дешево, но некачественно»), автоматический контроль («качественно, но дорого»).

Для автоматизации процедуры оптимизации ТП, описанная в [3], компьютерная программа оценки динамики распределений  $Q_m(l_m)$  в ходе ТП, дополнена блоком определения затрат  $Z_{\mu}$  по предложенной методике. Для иллюстрации этой методики рассмотрим пример оптимизации фрагмента ТП монтажа элементов на плату преобразователя.

Данный ТП включает следующие основные операции: ТО1 – комплектация узла, содержащего плату и элементы; ТО2 – монтаж и пайка элементов на плату; КО1 – контроль правильности комплектующих; КО2 – контроль правильности электрических соединений платы. Применяется формализованный подход, при котором учитывается возможность перепроверки результатов КО с помощью дополнительных (корректирующих) операций в соответствии с методикой [3], и не учитывается степень

автоматизации КО. При этом предполагается, что объем охвата контролем в каждом случае 100 %-ный. Учитывая такой подход, рассмотрим три возможных варианта ТП, которым соответствуют следующие пути:  $\mu_1$  – ТП без КО;  $\mu_2$  – ТП с КО после каждой ТП, но без перепроверки результатов контроля (без корректирующих операций);  $\mu_3$  – ТП с КО после каждой ТП с перепроверкой результатов каждой отдельной КО (с корректирующими операциями).

В качестве исходных данных для оценки затрат используются данные табл. 1, а также приведенные в табл. 2 результаты моделирования динамики распределений вероятностей дефектов и вероятностные характеристики ТП, полученные с помощью аналитических выражений [3].

Результаты расчета средних приведенных затрат на проведение ТП по разным путям представлены в табл. 3, где  $C_6$  – стоимость бракованных изделий,  $P_{скр}$  – вероятность наличия скрытых дефектов.

**Таблица 1.** Исходные данные для оптимизации ТП изготовления платы преобразователя по экономическому критерию

Тип операции	$t_i$ , ч	$C'_{Ti}$ , грн	$E$ , год	$k_{Ti}$ , грн	$Z_{Bm}$ , грн	$C_B$ , грн
ТО1	0,5	10	0,17	0	–	–
ТО2	0,7	15	0,17	0,3	–	–
КО1 без перепроверки результатов	0,5	10	0,17	0,16	5	50
КО2 без перепроверки результатов	0,5	20	0,17	0,16	10	300
КО1 с перепроверкой результатов	0,8	10	0,17	1	5	50
КО2 с перепроверкой результатов	0,8	20	0,17	1	10	300

**Таблица 2.** Результаты моделирования вероятностных характеристик ТП

Тип операции	$Q_{Bi}$	$P_{Bi}$	$L_{Bm}$ , шт	$P_{\Gamma}$
ТО1	–	–	–	1
ТО2	–	–	–	1
КО1 без перепроверки результатов	0,0088	0,026	0,1	0,85
КО2 без перепроверки результатов	0,01	0,0028	0,1	0,82
КО1 с перепроверкой результатов	0,0053	0,0275	0,3	0,972
КО2 с перепроверкой результатов	0,0007	0,0031	0,2	0,99

**Таблица 3.** Результаты моделирования ТП

Вариант ТП	Себестоимость ТО1, грн.	Себестоимость КО1, грн.	Себестоимость ТО2, грн.	Себестоимость КО2, грн.	$C_6$	Затраты на ТП, грн.	$P_{\Gamma}^0$	$P_{\Gamma}^k$	$P_{скр}$
$\mu_1$	5	–	11,01	–	160	176,01	1	1	0,39
$\mu_2$	5	5,45	11,01	40,03	30,44	61,5	1	0,67	0,1
$\mu_3$	5	8,32	11,01	16,38	0,48	40,71	1	0,96	0,04

Из полученных результатов видно, что оптимальным по критерию  $l_0$  является путь  $\mu_3$ , а экономия на контрольных операциях по путям  $\mu_1$  и  $\mu_2$  полностью нивелируется затратами на устранение брака, гарантийное обслуживание и возвраты бракованных изделий. Наименьшие затраты по данному пути достигаются благодаря проведению КО и корректирующих операций в соответствии с методикой [2].

### ВЫВОДЫ

1. С использованием предложенных ранее [3] авторами вероятностных моделей КО и ТО получены технико-экономические модели этих операций.

2. Предложена модель вариантов ТП в виде конечно направленного графа, позволяющая найти оптимальный ТП с учетом динамики распределений вероятностей дефектов в изделиях в ходе ТП и связанных с этим приведенных стоимостных затрат.

3. Применение предложенных моделей проиллюстрировано компьютерным расчетом оптимизации фрагмента ТП изготовления платы преобразователя.

Дальнейшие исследования направлены на определение границ оптимальности выбранного варианта ТП.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Гаскаров, Д. В. Оптимизация технологических процессов в производстве электронных приборов / Д. В. Гаскаров. – М. : Высш. шк., 1986. – 191 с.
2. Бобало, Ю. Я. Керування процесами формування та контролю заданих властивостей у виробництві електронних пристроїв / Ю. Я. Бобало, Л. А. Недоступ, М. Д. Кіселічний // Вісник Львівського політехнічного інституту. – 2009. – № 2. – С. 7–11.
3. Поляков, М. А. Моделирование динамики распределений дефектов в изделиях в ходе технологического процесса / М. А. Поляков, В. В. Василевский // Системные технологии. – 2013. – № 4 (87). – С. 73–81.

Стаття надійшла до редакції 19.06.2013.

Василевський В. В.<sup>1</sup>, Поляков М. О.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Аспірант, Запорізький національний технічний університет, Україна

<sup>2</sup>Канд. техн. наук, доцент, Запорізький національний технічний університет, Україна

### ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ МОНТАЖУ ЕЛЕКТРОРАДІОЕЛЕМЕНТІВ НА ОСНОВІ ЙМОВІРНІСНИХ ТА ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИХ МОДЕЛЕЙ КОНТРОЛЬНИХ ОПЕРАЦІЙ

Запропонована модель варіантів технологічного процесу у вигляді кінцево направленного графу, що дозволяє знайти оптимальний процес з урахуванням динаміки розподілу ймовірностей дефектів у виробках і пов'язаних з цим приведених вартісних затрат. Застосування запропонованих моделей проілюстровано комп'ютерним розрахунком оптимізації фрагменту технологічного процесу виготовлення плати перетворювача.

**Ключові слова:** технологічний процес, технологічна операція, контрольна операція, граф, моделювання, приведена собівартість.

Vasilevskij V. V.<sup>1</sup>, Polyakov M. A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Graduate student, Zaporizhian National Technical University, Ukraine

<sup>2</sup>Associate Professor, Ph.D., Zaporizhian National Technical University, Ukraine

### OPTIMIZATION OF TECHNOLOGICAL PROCESS FOR RADIO COMPONENTS INSTALLATION BASED ON PROBABILISTIC AND TECHNICAL-ECONOMICAL MODELS CONTROL OPERATIONS

The existing approach to the optimization of the technological processes does not adequately account for differences in quality of products, manufactured by different embodiments of technological process, if output control is not guaranteed to detect all defects. Also not taken into account correction of products quality, which is based on results of control operations. The purpose of research is improving quality of technological processes optimization based on accounting for correction of quality during control operations and probabilistic costs for eliminating defects on the following stages of manufacturing.

To achieve this purpose we proposed a model of different variants of technological process as a course directed graph. This model allows finding optimal technological process with taking into account dynamics of defects distributions during of technological process and adjusted costs.

For illustration of proposed model we calculated the fragment of converter's board manufacturing process.

**Keywords:** technological process, technological operation, control operation, graph, modeling, reduced cost.

### REFERENCES

1. Gaskarov D. V. Optimizaciya tehnologicheskix processov v proizvodstve e'lektronnix priborov. Moscow, Vy'ssh. shk., 1986, 191 p.
2. Bobalo Yu. Ya., Nedostup L. A., Kiselychnyk M. D. Keruvannia protsessamy formuvannia ta kontroliu

zadanykh vlastyvostei u vyrobnytstvi elektonnykh prystroiv, *Visnyk Lvivskogo politekhnichnogo instytutu*, 2009, No. 2, pp. 7–11.

3. Polyakov M. A., Vasilevskij V. V. Modelirovanie dinamiki raspredelenij defektov v izdeliyax v kode tehnologicheskogo processa, *Sistemny'e tehnologii*, 2013, No. 4 (87), pp. 73–81.