

## МЕТОД РАЦИОНАЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ ПРОЦЕССА КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА

А.Г. Трошина, А.Н. Ивутин, Ю.В. Французова

*Рассматривается проблема рациональной организации процесса производства с использованием методологии семантических сетей Петри-Маркова. Предложен метод распараллеливания этапов и работ в процессе конструкторско-технологического подготовки на основе их семантических связей.*

*Ключевые слова: параллельное проектирование, семантические сети Петри-Маркова, распараллеливание.*

Процесс производства изделий включает в себя множество этапов от формулирования технического задания до послепродажного обслуживания. Одним из ключевых этапов является этап конструкторско-технологической подготовки производства (КТПП). Несмотря на развитие средств автоматизации конструкторского и технологического проектирования, эффективность КТПП все еще сильно зависит от навыков специалистов и рациональной организации этих процессов. Обеспечение наличия у специалистов необходимых навыков для работы является вопросом кадровой политики предприятия. Рациональная организация процесса КТПП требует анализа этого процесса с учетом решаемых задач и организационной структуры предприятия, учитывающий распределение работ между отделами и даже отдельными сотрудниками предприятия.

Одним из перспективных подходов к повышению эффективности КТПП является использование методов параллельного проектирования [1], позволяющих организовать процесс таким образом, чтобы было возможно выполнять некоторые этапы как конструкторского, так и технологического проектирования параллельно. Для этого необходимо проанализировать поток документов, оформляемых в процессе КТПП и рассмотреть логические взаимосвязи между процессами разработки проектной документации.

Наибольшей наглядностью обладают графические методы моделирования процессов, такие как например, DFD-диаграммы [2]. Недостатком такого подхода является невозможность анализа численных характеристик процесса, а именно оценку временных затрат (основной критерий эффективности процесса) на КТПП. Хорошо зарекомендовал себя подход, рассмотренный в [3], предполагающий использование математического аппарата сетей Петри с добавлением к ним математических моделей марковских процессов, что позволяет не только описывать поведение системы на событийном уровне, но и оценивать временные характеристики. Однако

целесообразным представляется использовать следующее расширение сетей Петри-Маркова (СПМ) – семантических сетей Петри-Маркова (ССПМ) [4]. Добавление семантики в СПМ обусловлено необходимостью анализа, какие из процессов обязательно должны выполняться последовательно из-за логических связей между этапами, а какие из этапов или какие из документов могут разрабатываться параллельно.

### Применение ССПМ для моделирования ПКТПП

Семантическая сеть Петри-Маркова представляет собой трехдольный ориентированный граф с вершинами трех типов (рис.1): позиции  $A$ , обозначаемые кружками и представляющие процесс подготовки документов; переходы по управлению  $Z^C$ , обозначаемые утолщенными линиями и представляющими передачу документа с одного этапа на другой; переходы по семантическим связям  $Z^S$ , обозначаемые треугольником и служащие для указания на связь предшествования, т.е. необходимости использования информации, полученной ранее на данном этапе.

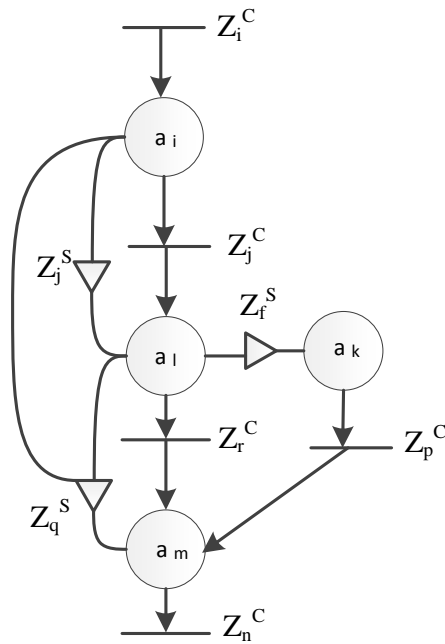
Полушагом по управлению называется перемещение по ССПМ, при котором из позиции  $a_{i(a)}$  попадают в сопряженный с ней переход. Полушагом по управлению называется перемещение по ССПМ из перехода в сопряженную с ним позицию  $a_{i(a)}$  для случая переходов по управлению. Каждый полушаг может быть описан множеством, мощностью два:

$$\begin{aligned}\sigma_{i(a),i(Z^C)} &= (a_{i(a)}, Z_{i(Z^C)}^C); \\ \sigma_{i(Z^C),i(a)} &= (Z_{i(Z^C)}^C, a_{i(a)}).\end{aligned}$$

Два последовательных полушага образуют шаг. Аналогично даются определения полушагам по семантическим связям. Полушагом по семантическим связям  $\sigma_{i(a),i(Z^S)}$  называется перемещение по ССПМ из позиции  $a_{i(a)}$  в сопряженный с ней переход. Полушагом по семантическим связям называется перемещение по ССПМ из перехода  $Z_{i(Z^S)}^S$  в смежную позицию  $a_{i(a)}$ :

$$\begin{aligned}\sigma_{i(a),i(Z^S)} &= (a_{i(a)}, Z_{i(Z^S)}^S); \\ \sigma_{i(Z^S),i(a)} &= (Z_{i(Z^S)}^S, a_{i(a)}).\end{aligned}$$

Для ССПМ, описывающей процесс КТПП, справедливо, что в сети имеются, как примитивные, так и непримитивные переходы по управлению и по семантическим связям.



**Рис. 1. Фрагмент семантической сети Петри-Маркова**

Под примитивными переходами по управлению и по семантическим связям ССПМ [4, 5] понимают элемент структуры, когда мощности входной и выходной функций переходов равны 1, т.е.

$$\left| I_A(z_{j(z^C)}^C) \right| = \left| O_A(z_{j(z^C)}^C) \right| = 1 \quad (1)$$

$$\left| I_A(z_{j(z^S)}^S) \right| = \left| O_A(z_{j(z^S)}^S) \right| = 1. \quad (2)$$

где  $I_A(z^C)$  и  $O_A(z^C)$  - соответственно входная и выходная функции переходов по управлению;  $I_A(z^S)$  и  $O_A(z^S)$  — соответственно входная и выходная функции переходов по семантическим связям.

В ССПМ возможность взаимодействия асинхронных параллельных процессов обеспечивается непримитивными переходами по управлению — fork, join и synchro [5]:

$$\text{fork, } \left| I_A(z_{j(z^C)}^C) \right| = 1, \left| O_A(z_{j(z^C)}^C) \right| > 1, \text{ т.е. порождающая операция,}$$

которая описывает действие, в результате которого запускается один или несколько дополнительных процессов, выполняющихся параллельно.

$$\text{join, } \left| I_A(z_{j(z^C)}^C) \right| > 1, \left| O_A(z_{j(z^C)}^C) \right| = 1, \text{ т.е. поглощающая операция,}$$

которая описывает действие, в результате которого один или несколько параллельных процессов объединяются в один.

$$\text{synchro, } \left| I_A(z_{j(z^C)}^C) \right| = n, \left| O_A(z_{j(z^C)}^C) \right| = m, n > m, \text{ т.е. синхронизи-}$$

рующая операция, которая характеризует действие, в результате которого два и более параллельных процессов ожидают завершения друг друга, после чего их независимое выполнение продолжается.

Так как в процессе КТПП на данном этапе может потребоваться информация с нескольких предыдущих этапов, то в ССПМ предусматривается наличие непримитивного перехода по семантическим связям s-join,

$$\left| I_A(z_{j(z^S)}^S) \right| > 1, \left| O_A(z_{j(z^S)}^S) \right| = 1, \text{ т.е. операция объединения информации из}$$

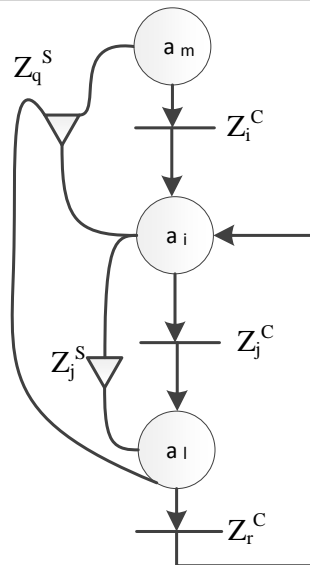
нескольких предыдущих процессов для использования ее в одном текущем.

Благодаря добавлению семантики появляется возможность устранить громоздкое описание условий срабатывания переходов по управлению. Для последовательной организации процесса все переходы по управлению полагаются примитивными и безусловными. При параллельной организации процесса только непримитивные переходы по управлению join содержат условия, выражаемые в форме конъюнкции полушагов из входных позиций в данный переход, то есть  $\sigma_{i(a),i(z^C)}$ , где  $\lambda_i^C$  - условие срабатывания i-го перехода по управлению. Непримитивные переходы по семантическим связям могут содержать сложные условия в виде ДНФ, то есть  $\sigma_{i(a),i(z^S)}$ , где  $\lambda_i^S$  - условие срабатывания i-го перехода по семантическим связям.

Так как процесс КТПП подразумевает проверку принятых решений и в случае неудовлетворительного результата проверки – возврат на предыдущий или предыдущие этапы, то в ССПМ, моделирующей КТПП, возможны циклические структуры, пример которых представлен на рис. 2.

Наличие циклов, то есть возвращение на уже пройденный этап требует введение «или» в условие для семантического перехода s-join.

При моделировании процесса для описания циклических структур необходимо ввести матрицу вероятностей срабатывания того или иного перехода  $q$ , при этом для вероятность срабатывания любого перехода из вершины, не содержащей ветвление, принимается равной 1, а вероятности срабатывания переходов из вершины ветвления определяются в соответствии с вероятностью нахождения ошибки и вероятностью критичности ошибки (то есть параметра, указывающего на каком этапе была допущена ошибка).



**Рис. 2. Циклическая структура в ССПМ**

Преимуществом такого подхода к моделированию КТПП является то, что с их помощью можно моделировать как весь процесс, так и разработку отдельных документов, то есть использовать подход вложенных ССПМ, предложенный Ломазовой И.А. [6]. В первом, более общем, случае в качестве позиций будет рассматривать отдельный этап КТПП, завершающийся разработкой соответствующего документа, а в качестве фишек в ССПМ выступают разрабатываемые на этом этапе документы. Во втором, более детальном, варианте позиции – это определенные операции по разработке документа, а фишки – разработанные элементы документа. Например, общее описание: позиция – эскизное проектирование, фишка – документ, а именно эскизный проект; детальное описание: позиция – расчет прочности, фишка – элемент проекта, а именно проводимые расчеты.

Для оценки временных характеристик используется полумарковская матрица  $h(t)$  размером  $J(a) \times J(z^C)$ ; где  $t$  — время, задающая временные задержки или в общем случае функцию плотности распределения времени выполнения того или иного этапа КТПП.

### **Распараллеливание последовательного процесса**

Кроме простого моделирования процесса КТПП, использование ССПМ позволяет преобразовать последовательное выполнения КТПП в параллельное с учетом имеющихся семантических связей между этапами. Специфика процесса КТПП такова, что при распараллеливании можно убрать все циклические структуры из алгоритма, так как они по сути не оказывают влияние на общий ход процесса, а только осуществляют возврат на предыдущие этапы для исправления ошибок, и рассматривать простую линейную цепочку действий.

Таким образом, возникает задача преобразования линейной цепочки без циклов и ветвлений в параллельную сеть.

Алгоритм преобразования линейного процесса в параллельный на основе представления ССПМ в виде полу-матриц инцидентности. Для переходов по управлению имеем две матрицы  $M_{C1} = \begin{bmatrix} m_{C_{ai,Z_j^C}} \end{bmatrix}$  – полу-матрица инцидентности сети Петри, отображающая полушаги из позиции  $a_i$  в переход по управлению  $Z_j^C$ , и  $M_{C2} = \begin{bmatrix} m_{C_{Z_j^C,ai}} \end{bmatrix}$  – полу-матрица инцидентности сети Петри, отображающая полушаги из перехода  $Z_j^C$  по управлению в позицию  $a_i$ .

Условие 1. Для процесса без циклов и ветвлений справедливо, что  $\forall i \left| \left\{ m_{C_{ai,Z_j^C}} \neq 0 \right\} \right| \leq 1$  и  $\forall i \left| \left\{ m_{C_{Z_j^C,ai}} \neq 0 \right\} \right| \leq 1$ , то есть позиция может являться входной позицией только одного перехода и аналогично она может являться выходной позицией только одного перехода.

Условие 2. Если  $\forall i \ m_{C_{ai,Z_j^C}} = 0$ , то  $Z_j^C$  начальный (стартовый) переход системы.

Условие 3. Если  $\forall i \ m_{C_{Z_j^C,ai}} = 0$ , то  $Z_j^C$  конечный переход системы.

Наличие непримитивных переходов может быть обнаружено в матрице следующим образом:

1. Если в строке  $j$  матрицы  $M_{C2}$   $\left| \left\{ m_{C_{Z_j^C,ai}} \neq 0 \right\} \right| > 1$ , то переход  $Z_j^C$  является переходом типа fork.

2. Если в столбце  $j$  матрицы  $M_{C2}$   $\left| \left\{ m_{C_{ai,Z_j^C}} \neq 0 \right\} \right| > 1$ , то переход  $Z_j^C$  является переходом типа join.

3. Если одновременно выполняются оба условия, то переход  $Z_j^C$  является переходом типа synchro.

Для переходов по семантическим связям аналогично имеем две матрицы  $M_{S1} = \begin{bmatrix} m_{S_{ai,Z_i^S}} \end{bmatrix}$  – полу-матрица инцидентности сети Петри, отображающая полушаги из позиции  $a_i$  в переход по семантическим связям

$Z_j^S$ , и  $M_{S2} = \begin{bmatrix} m_{S_{Z_j^S, ai}} \end{bmatrix}$  – полу-матрица инцидентности сети Петри, отображающая полушаги из перехода  $Z_j^S$  по семантическим связям в позицию  $a_i$ .

Условие 4. Для ССПМ справедливо, что  $\forall i \left\{ \left\{ m_{S_{Z_j^S, ai}} \neq 0 \right\} \right\} \leq 1$ , то

есть позиция может являться выходной позицией только одного перехода.

Условие 5. Если  $\forall j \quad m_{S_{Z_j^S, ai}} = 0$ , то  $a_i$  начальная позиция системы.

Условие 6. Если  $\forall j \quad m_{S_{ai, Z_j^S}} = 0$ , то  $a_i$  конечная с точки зрения семантики позиция системы.

Если в столбце  $j$  матрицы  $M_{S2} \left\{ \left\{ m_{S_{ai, Z_j^S}} \neq 0 \right\} \right\} > 1$ , то переход  $Z_j^S$

является переходом типа s-join.

Алгоритм распараллеливания основан на следующем свойстве рационально-организованной семантической сети Петри-Маркова (РОССПМ):

Условие 7. В РОССПМ две позиции, соединенные переходом по управлению, также соединены и переходом по семантическим связям, то есть  $\forall j \quad Z_j^C \quad a_i \in I_A(z_{j(z^C)}^C) \text{ и } a_k \in O_A(z_{j(z^C)}^C) \Rightarrow \exists Z_m^S \quad a_i \in I_A(z_{m(z^S)}^S) \text{ и } a_k \in O_A(z_{m(z^S)}^S)$ .

Таким образом при распараллеливании процессов в ССПМ необходимо добиться того, чтобы на каждом шаге управление передавалось в ту позицию, с которой имеется семантическая связь. Алгоритм основан на преобразовании матриц  $M_{S1}$  и  $M_{S2}$ .

1. Создаем новые матрицы  $M_{C1} = M_{S1}$  и  $M_{C2} = M_{S2}$ .

2. Добавляем начальный переход, для этого в матрицу  $M_{C1}$  добавляем столбец, а в матрицу  $M_{C2}$  строку. Новый столбец матрицы  $M_{C1}$  заполняется нулями, новая строка матрицы  $M_{C2}$  заполняется следующим образом  $m_{C_{Z_j^C, ai}} = 1$ , если для  $a_i$  выполняется условие 5, иначе  $m_{C_{Z_j^C, ai}} = 0$ .

3. Добавляем конечный переход, для этого в матрицу  $M_{C1}$  добавляем столбец, а в матрицу  $M_{C2}$  строку. Новая строка матрицы  $M_{C2}$  заполняется нулями, новый столбец матрицы  $M_{C1}$  заполняется следующим образом  $m_{C_{ai, Z_j^C}} = 1$ , если для  $a_i$  выполняется условие 6, иначе  $m_{C_{ai, Z_j^C}} = 0$ .

4. Проверяем, если есть совпадающие строки матрицы МС2 и столбцы матрицы МС1, то объединяем их в один переход.

5. Проверяем выполнение условия 1. Если выполнено, то получили РОССПМ, если нет, то проверяем длину пути (максимальное число возможных переходов между вершинами). В матрице  $M_{C1}$  в строке  $i$  оставляем только те  $m_{Cai, Z_j^C} = 1$ , для которых нет более длинных путей приводящих систему из позиции  $a_i$  в позицию  $a_k \in O_A(z_{j(z^C)}^C)$ , остальные элементы приравниваем нулю.

Пример последовательной и построенной на ее основе параллельной сети представлен на рис. 3 и 4.

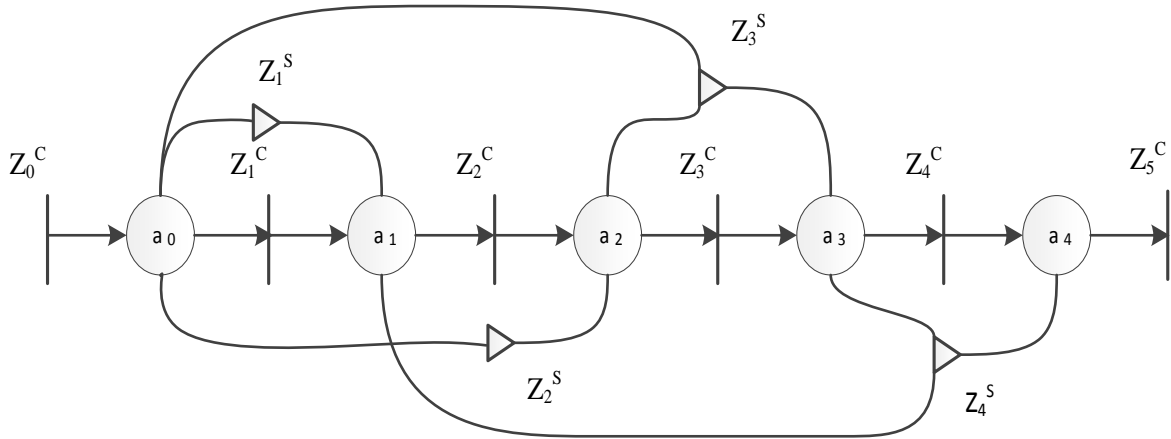


Рис. 3. ССПМ последовательной КТПП

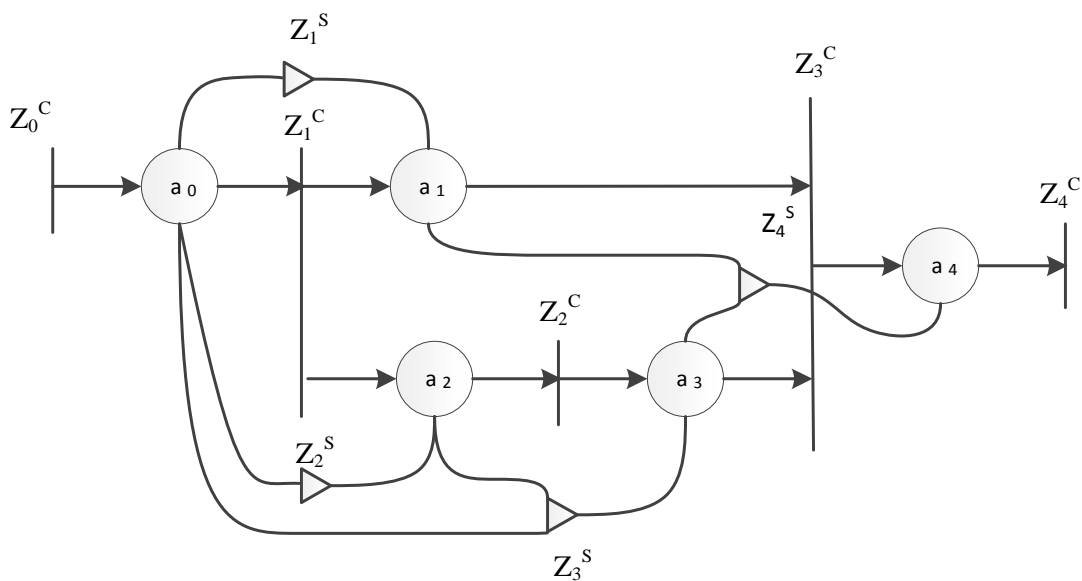


Рис. 4. ССПМ параллельной КТПП



После завершения процедуры распараллеливания добавляются переходы, возвращающие процесс назад для исправления ошибок. Если возврат идет в позицию, находящуюся внутри параллельной ветви, то в матрицы инцидентности просто добавляется соответствующий переход. Если осуществляется выход за пределы параллельного блока, то входная функция добавляемого перехода должна содержать не только изначальную позицию, но и все позиции, являющиеся входом перехода join, завершающего параллельный блок, за пределы которого происходит выход.

Применение математического аппарата ССПМ позволяет наиболее эффективно планировать работу предприятия в процессе КТПП изделия за счет организации параллельной работы над проектом с учетом логических связей.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Тульской области в рамках научного проекта 16-41-710160 p\_a.

### Список литературы

1. Автоматизированные системы технологической подготовки производства в машиностроении / Г.К. Горанский [и др.]; под ред. чл.-кор. АНБССР Г.К. Горанского. М.: Машиностроение, 1976.
2. Adler M. "An algebra for data flow diagram process decomposition." IEEE Transactions on Software Engineering 14.2, 1988. P. 169-183.
3. Игнатьев В.М., Ларкин Е.В. Сети Петри-Маркова. Tula: TulGU, 1997.
4. Ivutin A.N., Troshina A.G., Yesikov D.O., Vasiliev S.N. Estimation of parallel algorithms efficiency based on modified Petri nets. Embedded Computing (MECO) // 6th Mediterranean Conference, 2017. P. 1-4.
5. Ивутин А.Н., Трошина А.Г., Есиков Д.О. Применение семантических сетей Петри-Маркова для решения задачи распараллеливания алгоритмов. Вестник Рязанского радиотехнического университета. Рязань: РГРУ, 2016. No. 58. С. 49-56.
6. Ломазова И.А. Вложенные сети Петри. М.: Научный мир, 2004.

*Трошина Анна Геннадьевна, канд. техн. наук, доц., [atroshina@mail.ru](mailto:atroshina@mail.ru), Россия, Тула, Тульский государственный университет,*

*Ивутин Алексей Николаевич, канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой, [alexey.ivutin@gmail.com](mailto:alexey.ivutin@gmail.com), Россия, Тула, Тульский государственный университет,*

*Французова Юлия Вячеславовна, канд. техн. наук, доц., [julianna\\_1204@mail.ru](mailto:julianna_1204@mail.ru) Россия, Тула, Тульский государственный университет*

---

METHOD OF RATIONAL ORGANIZATION OF THE PROCESS OF DESIGN  
AND TECHNOLOGICAL PREPARATION FOR MANUFACTURING

A.G. Troshina, A.N. Ivutin, Y.V. Frantsuzova

*The problem of rational organization of the process of design and technological preparation for manufacturing with application of semantic Petri-Markov nets is considered. The method of parallelization of the stages of the works within design and technological preparation for manufacturing based on their semantic relations.*

*Key words: concurrent engineering, semantic Petri-Markov nets, parallelization.*

*Troshina Anna Gennad'evna, candidate of technical sciences, docent, [atroshina@mail.ru](mailto:atroshina@mail.ru), Russia, Tula, Tula State University,*

*Ivutin Alexey Nikolaevich, candidate of technical sciences, docent, head of department «Computer technology», [alexey.ivutin@gmail.com](mailto:alexey.ivutin@gmail.com), Russia, Tula, Tula State University,*

*Frantsuzova Yulia Vyacheslavovna, candidate of technical sciences, docent, [juliana\\_1204@mail.ru](mailto:juliana_1204@mail.ru), Russia, Tula, Tula State University*

УДК 62.50

**РАЗРАБОТКА ПРОЦЕДУРЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ  
НА БАЗЕ СОВРЕМЕННОГО ПОДХОДА  
К ПРОЕКТИРОВАНИЮ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ**

Е.М. Баранова, А.Н. Баранов

*Представлен обзор проблемы рассогласования процессов внедрения новых производственных технологий и обеспечения качества выпускаемой продукции, приведена современная процедура синтеза планов контроля для оценки стандартности изделий.*

*Ключевые слова: контроль, качество, выборка, планы контроля, замеры, степень деформации, объем выборки, приемочное число, браковочное число.*

В ходе производства любого рода изделий необходим тщательный и своевременный контроль качества выпускаемой продукции. В большинстве случаев применяется выборочный контроль.

Наибольший интерес с позиций управления качеством представляет выборочный контроль в процессе производства, так как здесь существует так называемая обратная связь, а именно контроль качества позволяет судить об эффективности и воспроизводимости технологического процесса, в то время как допустимые уровни эффективности и воспроизводимости техпроцесса позволяет судить о приемлемом качестве изготавливаемой продукции.