

# **Автоматизация проектных процедур разработки технологических операций со сложной структурой**

*С.Г. Мутин,  
доц., каф. "Техн-ия машин-ия", к.т.н., ser\_gen@inbox.ru,  
П.Ю. Бочкарёв,  
проф., каф. "Техн-ия машин-ия", д.т.н., bpy@mail.ru,  
СГТУ им. Ю.А. Гагарина, г. Саратов*

Рассматриваются вопросы создания новых моделей, методик и алгоритмов для формализации проектных процедур, связанных с разработкой технологических операций со сложной структурой в условиях многономенклатурного производства. Приводятся модели проектных процедур по формированию вариантов технологической оснастки, разработке структур технологических операций. В результате достигается полная автоматизация проектных процедур разработки технологических операций и появляется возможность создания эффективной системы автоматизированного проектирования, резко сокращающей сроки и повышающей качество технологической подготовки производства.

The article describes the new models methods and algorithms for the formalization of design procedures associated with the development of machining operations with a compound structure under conditions of multiproduct manufacturing. We give the model of design procedures for the formation of tooling options and development of machining operation structures. The result is complete automation of design procedures for machining operation development and the possibility to create an efficient computer-aided process planning system that significantly reduces the time and enhances the quality of technological preparation of manufacturing.

## **Введение**

Вопросы, связанные с автоматизацией проектирования, актуальны на всём протяжении развития машиностроительного производства, поскольку потребности рынка постоянно растут, увеличивается конкуренция, ужесточаются требования к длительности производственного цикла, существенную долю которого составляет технологическая подготовка производства. Однако на настоящий момент не существует программных продуктов, способных полностью автоматизировать все проектные процедуры, связанные с разработкой технологических процессов и операций. Имеющиеся на рынке и используемые машиностроительными предприятиями системы автоматизированного проектирования технологических процессов являются лишь автоматизированными справочниками и средствами оформления технологической документации. Остаются нерешенными задачи автоматизации творческого характера, к числу которых относятся разработка структуры технологической операции и формирование комплектов технологической оснастки. В условиях недостатка времени технологу приходится принимать проектные решения, которые не всегда оказываются рациональными для складывающихся производственных условий, что приводит к снижению эффективности работы производственной системы, увеличению временных и материальных затрат и, следовательно, к снижению конкурентоспособности машиностроительного предприятия.

Резкое сокращение сроков и повышение качества технологической подготовки многономенклатурных производств может быть достигнуто путём полной автоматизации всех проектных процедур, необходимых для проектирования технологий механообработки, на основе разработки новых методик и моделей, формализующих процессы принятия решений, включающих субъективный характер проектирования, и алгоритмов, обеспечивающих возможность создания комплексных систем автоматизированного проектирования, способных учитывать особенности конкретных производственных систем и складывающуюся производственную ситуацию. Такой подход реализован в системе автоматизированного планирования технологических процессов (САПлТП) [1]. В работах [2, 3] приведены инновационные аспекты САПлТП и сформулированы основные принципы создания системы автоматизированного проектирования технологических операций в многономенклатурном производстве.

Для многономенклатурного мелкосерийного и серийного производства характерна высокая концентрация операций, что обуславливает необходимость проектирования технологических операций со сложной структурой, которые предусматривают возможность параллельной обработки нескольких поверхностей детали одним комбинированным или несколькими инструментами, а также одновременной обработки нескольких деталей на одном станке. Такие операции являются высокоэффективными, но требуют высокопроизводительного оборудования с широкими технологическими возможностями. Для подобных операций и оборудования на данный момент не существует эффективных программных средств автоматизации проектирования [4].

В рамках создания САПлТП сформированы модели, методики и алгоритмы, формализующие проектные процедуры для операций, выполняемых на оборудовании фрезерной, сверлильной и токарной групп [5, 6, 7, 8 и др.], но для технологических операций со сложной структурой требуется их переработка, поскольку при проектировании одной операции может потребоваться использование проектных процедур для различных групп оборудования, и необходимо обеспечить их согласование. Кроме того, традиционные способы организации проектирования технологических операций для различных групп оборудования порождают неуправляемую избыточность информации, в результате чего появляются дополнительные затраты на хранение, многократные однотипные или дублирующие друг друга проектные процедуры, увеличивается вероятность противоречивой информации.

Настоящая работа состоит из двух разделов. В первом разделе приводится способ формализации проектных процедур генерации технологической оснастки. Во втором разделе показана возможность моделирования проектных процедур генерации вариантов структур технологических операций с помощью сетей Петри. В заключении приведены основные выводы и даны рекомендации по использованию полученных результатов.

## 1. Моделирование проектных процедур генерации технологической оснастки

Анализируя вопросы разработки технологических процессов (ТП), следует отметить, что одним из наиболее сложных этапов проектирования операции является выбор технологической оснастки, так как он предполагает широкую многовариантность решений и во многом определяет структуру операции и эффективность её реализации.

В первую очередь для решения задачи генерации возможных вариантов технологической оснастки необходимо формализовать структуру данных, которые имеются на начальном этапе проектирования. На предыдущих этапах проектирования формируется взаимосвязь между множеством технологических операций  $O = \{O_1, O_2, \dots, O_k, \dots, O_o\}$  и множеством переходов  $C = \{(C_{1,1}, C_{1,2}), (C_{2,1}), \dots, (C_{k,1}, C_{k,2}, C_{k,3}), \dots, (C_{o,1}, C_{o,2})\}$ , которые необходимо реализовать на каждой операции, выраженная в виде кортежей технологических переходов.

Каждый переход характеризуется множеством параметров:

$$C_{kj} = \langle C_{kj}^t, C_{kj}^e, C_{kj}^s, C_{kj}^d, C_{kj}^q, C_{kj}^m, C_{kj}^h \rangle, \quad (1)$$

где  $j$  – номер перехода в  $k$ -ом кортеже;  $C_{kj}^t$  – параметры оборудования (группа, модель, присоединительные размеры, размеры рабочей области и др.);  $C_{kj}^e$  – параметры установочно-зажимного приспособления;  $C_{kj}^s$  – тип обрабатываемой элементарной поверхности (ЭП);  $C_{kj}^d$  – размерные характеристики обрабатываемой поверхности;  $C_{kj}^q$  – требования к точности и качеству обрабатываемой поверхности;  $C_{kj}^m$  – характеристики материала обрабатываемой поверхности;  $C_{kj}^h$  – твёрдость обрабатываемой поверхности.

Генерация возможных вариантов режущего инструмента (РИ) представляет собой перебор множества вариантов РИ и установление возможности применения каждого типоразмера РИ на каждом технологическом переходе. Ввиду большого многообразия типоразмеров РИ, генерация возможных вариантов РИ должна происходить поэтапно. На ранних этапах необходимо установить параметры, которые позволят отсекают из всего множества РИ как можно большее количество различных типоразмеров РИ, что сократит число вариантов перебора РИ и, следовательно, время генерации возможных вариантов РИ.

С целью сокращения времени проектирования и максимального использования возможностей современной вычислительной техники, связанных с распараллеливанием процессов вычисления, учитывая особенности структуры базы данных по возможностям технологической оснастки, предлагается модель, построенная с помощью теории сетей Петри, в которой предусмотрено параллельное выполнение этапов генерации технологической оснастки на примере оборудования фрезерной группы (рис. 1).

Символьная интерпретация сети имеет вид

$$Sm = \{P, T, F, W, M\}, \quad (2)$$

где  $P = \{P_1, P_2, \dots, P_x\}$  – множество событий;  $T = \{T_1, T_2, \dots, T_y\}$  – множество сетевых переходов;  $F$  – входная функция;  $W$  – выходная функция;  $M$  – маркировка сети.

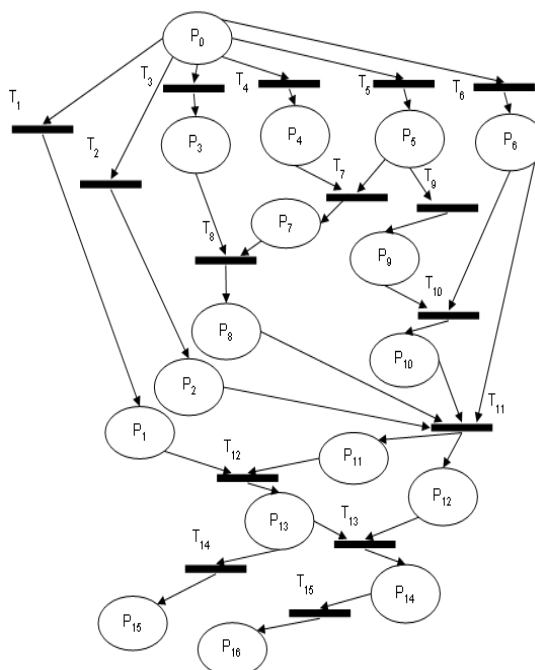


Рис. 1. Модель генерации возможных вариантов технологической оснастки для оборудования фрезерной группы

Применительно к рассматриваемой задаче множество событий спроектированной сети Петри  $P = \{P_1, P_2, \dots, P_x\}$  выступают как события, определяющие параметры соответствия на каждом этапе выполнения процедуры генерации возможных вариантов технологической оснастки. Множество сетевых переходов  $T = \{T_1, T_2, \dots, T_y\}$  отражают процедуры соответствия входных событий и учитывают ограничения, связанные с конструктивными и технологическими особенностями инструментов и обрабатываемых поверхностей. Посредством «запусков» сетевых переходов сеть меняет состояние в сторону получения вариантов оснастки, удовлетворяющих всем ограничениям.

Входная функция  $F$  отображает переход  $T_j$  в множество входных комплектов позиций  $F(T_j)$ . Выходная функция  $W$  отображает переход  $P_i$  в множество выходных комплектов позиций  $W(P_i)$ .

Маркировка сети  $M$  заключается в том, что каждому событию сети присваивается метка, соответствующая тому или иному параметру обработки или варианту инструмента. Для удобства отображения и восприятия сети множества

событий, отражающих один аспект соответствия, объединены в один узел. Множества событий выражают:  $P_0$  – corteжи технологических переходов  $C$ , поступивших на вход рассматриваемой процедуры,  $P_1$  – размеры обрабатываемых элементарных поверхностей (ЭП),  $P_2$  – требования к точности обрабатываемых ЭП,  $P_3$  – типы обрабатываемых ЭП,  $P_4$  – список обрабатываемых материалов на всех технологических переходах,  $P_5$  – группы оборудования,  $P_6$  – типы присоединений инструмента к станку,  $P_7$  – типы РИ,  $P_8$  – подгруппы РИ,  $P_9$  – группы вспомогательного инструмента (ВИ),  $P_{10}$  – типы присоединения ВИ к РИ,  $P_{11}$  – подгруппы РИ,  $P_{12}$  – подгруппы ВИ,  $P_{13}$  – типоразмеры РИ,  $P_{14}$  – типоразмеры ВИ,  $P_{15}$  – типоразмеры РИ, имеющиеся на складе,  $P_{16}$  – типоразмеры ВИ, имеющиеся на складе.

Рассмотрим пошаговую последовательность реализации процесса генерации возможных вариантов технологической оснастки для оборудования фрезерной группы. На первом шаге исходные события  $P_0$  выражают множество corteжей технологических переходов  $C$ , поступивших на вход рассматриваемой процедуры. Состояние сети описывается следующим образом:  $F(P_0) = \{ \}$ ,  $F(P_1) = \{ \}$ ,  $F(P_2) = \{ \}$ , ...  $W(P_0) = \{T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6\}$ ,  $W(P_1) = \{ \}$ ,  $W(P_2) = \{ \}$ , ... Сетевые переходы  $T_1, \dots, T_6$  выполняются для получения маркировок в выходных событиях. После этого сеть переходит в следующее состояние:  $F(P_1) = \{T_1\}$ ,  $F(P_2) = \{T_2\}$ ,  $F(P_3) = \{T_3\}$ ,  $F(P_4) = \{T_4\}$ ,  $F(P_5) = \{T_5\}$ ,  $F(P_6) = \{T_6\}$ . В этом состоянии сеть  $S_m$  отражает технические требования и ограничения для выполнения обработки на каждом технологическом переходе.

На втором и последующем шагах выполняются сетевые переходы  $T_7, \dots, T_{15}$ , в которых проверяется соответствия входных событий. На выходе переходов формируются множества возможных вариантов технологической оснастки, удовлетворяющих ограничениям.

Например, узел  $P_3$  соответствует множеству обрабатываемых ЭП, узел  $P_7$  – множеству типов РИ. Следовательно, в переходе  $T_8$  производится сравнение пар, полученных в результате декартова произведения множеств  $P_3$  и  $P_7$ , с таблицей соответствия, в которой заранее определены допустимые пары. В множество  $P_8$  таким образом попадают типы РИ, которые соответствуют обрабатываемым ЭП.

Анализируя разработанную структуру сети  $S$ , можно отметить, что процедуры проверки соответствия на многих сетевых переходах могут выполняться параллельно и независимо друг от друга, что обеспечивает значительное сокращение времени проектирования.

Таким образом, разработан универсальный метод описания процедуры генерации возможных вариантов технологической оснастки на основе сетей Петри, который можно применить для различных групп оборудования, учитывая специфику каждой группы путём изменения структуры сети и условий выполнения сетевых переходов.

## 2. Моделирование проектных процедур формирования структур технологических операций

Рассмотрим моделирование проектной процедуры формирования структуры технологической операции на примере проектирования операций, реализуемых на оборудовании токарной группы, ввиду высокой сложности задачи формализации, так как конструктивные особенности токарного оборудования предусматривают наличие одного или нескольких инструментальных суппортов, имеющих по одной или несколько позиций для размещения инструментов, и сверлильно-резьбонарезного устройства, в котором возможно размещение также одного или нескольких инструментов, а также возможное наличие дополнительного независимого шпинделя, способного выполнять обработку с применением осевых РИ. Работа всех этих устройств может происходить одновременно, что ставит задачу организации рационального использования параллельной обработки отдельных поверхностей детали при проектировании технологических операций.

Если рассматривать технологическую операцию как систему, состоящую из взаимосвязанных компонент – технологических переходов, каждый из которых содержит информацию об обрабатываемой ЭП, варианте РИ, отобранном на предыдущих этапах проектирования, то при описании системы необходимо учесть не только наличие взаимодействий, но и возможность совместной и параллельной реализации компонент. Наиболее подходящим для такого рода описания видится математический аппарат сетей Петри.

Исходное описание отдельной компоненты системы представлено в виде элемента множества технологических переходов  $C_i$ , которое поступает в виде corteжей с предыдущих этапов проектирования ТП. В ходе выполнения проектных процедур выбора вариантов технологической оснастки для каждого технологического перехода сформированы варианты РИ. Таким образом, описание отдельной компоненты системы имеет вид  $C_i(R_j)$ . Это означает, что на технологическом переходе  $C_i$  применяется вариант РИ  $R_j$ .

Методику формирования вариантов структур технологических операций, выполняемых на оборудовании токарной группы, целесообразно разделить по шагам, поскольку на данном этапе решаются задачи по рациональному размещению РИ по инструментальным суппортам и позициям и по формированию рациональной последовательности реализации технологических переходов.

Рассмотрим спроектированную сеть Петри (рис. 2), которая образует математическую модель проектной процедуры по рациональному размещению РИ по инструментальным суппортам и позициям.

Символьная интерпретация сети Петри для моделирования процедуры генерации возможных вариантов структур технологических операций, выполняемых на оборудовании токарной группы, выражается следующим образом:

$$Sp = \{P, T, F, W, M\}, \quad (4)$$

где  $P = \{P_1, P_2, \dots, P_x\}$  – множество событий;  $T = \{T_1, T_2, \dots, T_y\}$  – множество сетевых переходов;  $F$  – входная функция;  $W$  – выходная функция;  $M$  – маркировка сети.

$$\begin{aligned} F(P_1^1) &= \{ \}, F(P_1^2) = \{ \}, \dots \\ W(P_1^1) &= \{T_1^1, T_1^2, \dots, T_1^x\}, W(P_1^2) = \{T_1^1, T_1^2, \dots, T_1^x\}, \dots \\ M(P_1^1) &= C_1(R_1), M(P_1^2) = C_2(R_1), \dots, M(P_1^i) = C_i(R_j), \dots \\ F(P_2^1) &= \{T_1^1\}, F(P_2^2) = \{T_1^3\}, \dots \\ W(P_2^1) &= \{T_2^1, T_2^2, \dots, T_2^y\}, W(P_2^2) = \{T_2^1, T_2^2, \dots, T_2^y\}, \dots \\ M(P_2^1) &= C_1(R_1(A_1)), M(P_2^2) = C_3(R_5(A_2)), \dots, M(P_2^m) = C_i(R_j(A_u)), \dots \\ &\dots, \dots, \dots, \dots \\ \#(T_1^1, W(P_1^1)) &= u, \#(T_2^1, W(P_2^1)) = v, \\ \#(T_1^1, F(P_2^1)) &= 1, \#(T_1^2, F(P_2^3)) = 1, \dots \end{aligned}$$

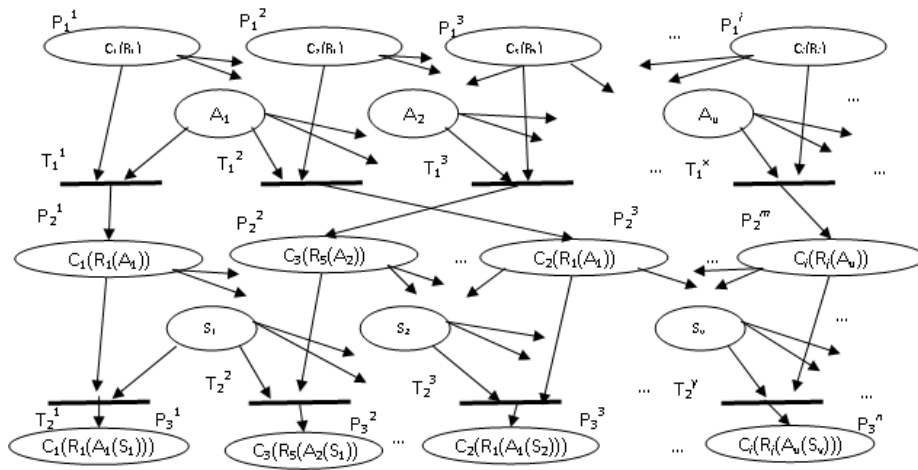


Рис. 2. Модель процедуры рационального размещения РИ по позициям оборудования

На первом шаге исходная маркировка спроектированной сети заключается в том, что каждому событию из множества  $P_1$  присваивается метка, соответствующая описанию одной из компонент системы. На этом шаге решаются задачи, связанные с анализом возможности размещения РИ в позициях станочной системы. Реакция множества сетевых переходов  $T_1$  зависит от возможности установки РИ в одном из суппортов, заданных множеством событий  $A$ , и порождает множество событий  $P_2$ . Реакция множества сетевых переходов  $T_2$  зависит от возможности установки инструмента, обозначенного в элементах множества  $P_2$ , в конкретной позиции, что определяется событиями из множества  $S$ .

В результате моделирования на данном шаге определяются все допустимые решения по размещению инструментов и, как следствие, варианты привязки каждой компоненты системы к инструментальным позициям оборудования. Маркировка событий в множестве  $P_3$  принимает вид:  $M(P_3^1) = C_1(R_1(A_1(S_1)))$ ,  $M(P_3^2) = C_3(R_5(A_2(S_1)))$ ,  $M(P_3^3) = C_2(R_1(A_1(S_2)))$ , ...,  $M(P_3^n) = C_i(R_i(A_3(S_3)))$ , ...

На следующем шаге производится последовательное объединение комплексов сети Петри в варианты технологической операции. Для этого определяются потенциальные возможности создания инструментальных наладок на основе информации, имеющейся в множестве событий  $P_3$ . С помощью спроектированной структуры сети и правил открытия сетевых переходов  $T_3$ ,  $T_4$  формируются варианты объединения комплексов, не использующих одинаковые позиции для РИ.

Мощности множеств  $T_3$ ,  $T_4$  зависят от исходной маркировки сети, которая определяет число комплексов сети, и соответствуют числу технологических переходов в рассматриваемой технологической операции. Движение по сети сверху вниз позволяет дополнить множества вариантов размещения РИ по позициям оборудования новыми комплексами.

На следующем этапе разработки структуры технологической операции необходимо определить последовательности выполнения технологических переходов. Решение этой задачи носит многовариантный характер, поскольку даже для одной инструментальной наладки последовательность реализации и временные интервалы реализации между технологическими переходами могут отличаться. В первую очередь необходимо получить варианты реализации технологических переходов с точки зрения последовательности их выполнения на основе следующих положений:

- комплексы, которые описывают обработку одной и той же ЭП, должны быть расположены по порядку реализации технологических переходов;
- необходимо учитывать пространственные ограничения, которые обусловлены типами обрабатываемых ЭП (например, «отверстие – внутренняя резьба», «наружная цилиндрическая поверхность – шпоночный паз»), заданные при конструировании детали;
- анализ характерных особенностей по расположению отдельных технологических переходов в структуре технологической операции (например, отрезка, центровка);
- анализ возможности параллельной обработки различных ЭП.

Процесс осуществления указанных проверок можно смоделировать с помощью сети Петри (рис. 3). При исследовании сети можно рассмотреть все возможные сочетания, учитывая ограничения не только между двумя комплексами, но и между группами уже сформированных последовательностей комплексов на основе индивидуального исследования взаимодействия каждого сочетания комплексов из двух групп. Результатом таких процедур является реакция сетевых переходов и изменения в маркировке сетевых событий.

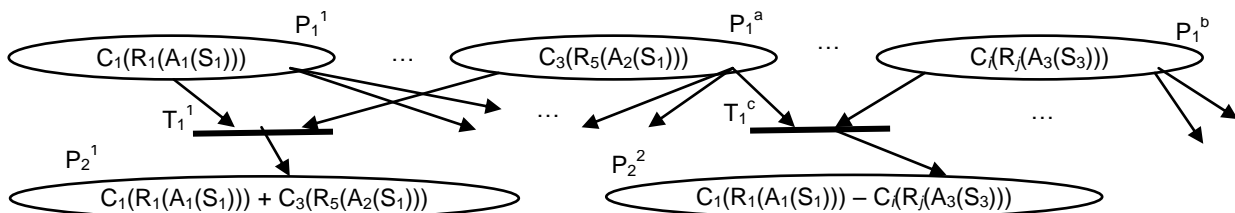


Рис. 3. Модель процедуры установления порядка выполнения технологических переходов

Итогом проектирования является конечное множество событий сети. При этом комплексы получают условные обозначения, определяющие вариант реализации технологической операции с точки зрения порядка выполнения технологических переходов:

«–» – с последовательным выполнением технологических переходов,

«+» – с параллельным выполнением технологических переходов.

Проверка возможности использования параллельной обработки проводится по следующим условиям:

- параллельная обработка может быть применена только для соседних по последовательности комплексов системы;
- РИ должны быть расположены на различных суппортах;
- не могут быть выбраны комплексы, относящиеся к одной и той же обрабатываемой ЭП;
- необходимо учитывать ограничения по пространственному расположению обрабатываемых ЭП;
- перемещения рабочих органов станка при реализации технологических переходов, анализируемых для объединения в параллельную обработку, должны быть близки и не противоречащими друг другу.

Дополнительно проводится анализ вариантов режимов обработки по удовлетворению ограничениям, отражающим одновременную реализацию технологических переходов. Среди них:

- суммарная мощность, затрачиваемая на резание, не должна превышать эффективную мощность станка;
- суммарное усилие (в случае использования одинаковых кинематических цепей при реализации рассматриваемых переходов) не должно превышать прочность механизма подачи станка.

Таким образом, на основе выполненных проверок формируется множество вариантов порядка реализации технологических переходов с учётом возможности параллельной обработки. Окончательный выбор структуры технологической операции производится по критериям, отражающим экономическую эффективность выполнения обработки. В качестве такого обобщающего показателя на данном этапе планирования ТП целесообразно использовать время реализации технологической операции.

### Заключение

В статье представлены способы моделирования проектных процедур, связанных с решением творческих задач по выбору вариантов технологической оснастки и формированию структур технологических операций. Впервые удалось формализовать наиболее трудоемкие и существенные процедуры проектирования технологических операций. Полученные результаты могут быть использованы для создания автоматизированной системы, обеспечивающей сокращение сроков и повышение качества технологической подготовки многономенклатурных производств за счет полной автоматизации проектных процедур разработки технологических операций.

### Литература

1. Бочкарёв, П.Ю. Системное представление планирования технологических процессов механообработки / П.Ю. Бочкарев // *Технология машиностроения*.– 2002. №1.– С.10-14.
2. Митин, С.Г. Инновационные аспекты автоматизации проектирования операций механической обработки в многономенклатурном производстве / С. Г. Митин, П. Ю. Бочкарев // *Инновационная деятельность*.– 2013. №4 (27).– С.36-41.
3. Митин, С.Г. Принципы создания системы автоматизированного проектирования технологических операций в условиях многономенклатурного производства / С. Г. Митин, П. Ю. Бочкарев // *Вектор науки Тольяттинского государственного университета*.– 2015. № 2 (32-2).– С. 117-122.
4. Митин, С.Г. Концепция проектирования операций со сложной структурой в системе автоматизированного планирования технологических процессов машиностроительных производств / С. Г. Митин, П. Ю. Бочкарев // *Высокие технологии в машиностроении: материалы Всерос. научно-технич. интернет-конф., г. Самара, 22-25 октября 2015 г.* / Отв. редактор В.Н. Трусов.-Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2015.-С.120-122.
5. Митин, С.Г. Формирование рационального комплекта режущего инструмента с применением аппарата динамического программирования / С. Г. Митин, П. Ю. Бочкарев // *СТИН*.– 2012. №6.– С.20-24.
6. Митин, С.Г. Генерация возможных вариантов структур технологических операций с применением аппарата теории графов / С. Г. Митин, П. Ю. Бочкарев // *Технология машиностроения*.– 2012. №4.– С.69-73.
7. Шалунов, В.В. Автоматизированное проектирование технологических операций, выполняемых на токарно-фрезерных автоматах продольного точения с ЧПУ / В.В. Шалунов, Д.В. Комаревцев, И.М. Семенихин // *Вестник Саратовского государственного технического университета*.– 2011. Т. 3. № 2 (58).– С. 146-150.
8. Разманова, Т.И. Разработка модели и основные этапы создания системы проектирования технологических процессов для оборудования сверлильной группы / Т.И. Разманова, С.Г. Митин // *Главный механик*.– 2015. №4.– С.38-42.