УДК 004.896

И.А. Хворов, В.А. Тимирязев, В.Г. Каймин, С.В. Дудко

ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ТОКАРНЫХ ОБРАБАТЫВАЮЩИХ ЦЕНТРОВ ЗА СЧЕТ КЛАСТЕРИЗАЦИИ ОБРАБАТЫВАЕМЫХ ДЕТАЛЕЙ В УСЛОВИЯХ МЕЛКОСЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Предложена математическая модель кластеризации базы данных по четырем признакам: количество деталей в партии, материал заготовки и диаметр заготовки, атак же количество режущего инструмента. Данная модель была применена в разработке автоматизированной системы группирования деталей вращения. Полученное программное обеспечение было внедрено в производственный цикл механообрабатывающего участка с гибким производственным модулем. Анализ изменения соотношения вспомогательного и основного технологического времени показал, что оборудование, обрабатывающее детали в предложенной программным продуктом последовательности, увеличило свой КПД. Метод хорошо зарекомендовал себя и показал среднее уменьшение вспомогательных переходов на замену заготовки и инструмента.

Ключевые слова: автоматизация, алгоритм, механическая обработка, операция, кластерный анализ, метод групповой обработки, гибкий обрабатывающий модуль, математическая модель.

Организационные формы и виды производственных процессов оказывают существенное влияние на повышение производительности труда. При этом основными факторами, предопределяющими выбор организационной формы и вида производственного процесса, являются количество изделий, подлежащих изготовлению в единицу времени и по неизменяемым чертежам, а так же их номенклатура. В зависимости от количества выпускаемых изделий, их номенклатуры, регулярно-

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 3. С. 250–261.
© 2017. И.А. Хворов, В.А. Тимирязев, В.Г. Каймин, С.В. Дудко.

сти выпуска и величины серии выбирают соответствующую организационную форму производства, которая непосредственно определяет характер реализации технологического процесса [1].

Существует пять основных типов производства – единичное, мелкосерийное, среднесерийное, крупносерийное и массовое [2]. При этом в мелкосерийном и среднесерийном изготовлении деталей малыми партиями возникают большие потери времени из-за переналадки оборудования при переходе от одной партии к другой. Есть ряд подходов к решению данной проблемы, среди которых – метод групповой обработки (МГО), существенный вклад в разработку которого внес проф. С.П. Митрофанов [3; 4; 5]. В основе метода лежит технологическая классификация заготовок, позволяющая сформировать группы изделий с последующей разработкой технологии групповой обработки без переналадки или с минимальной переналадкой оборудования [6].

В МГО под классом понимают совокупность изделий, характеризуемых общностью типа оборудования, необходимого для обработки заготовок в целом или их отдельных поверхностей. Результатом классификации является формирование групп, где основным критерием для объединения деталей в группу является общность обрабатываемых поверхностей или их сочетаний [7].

В настоящее время при разработке технологических процессов обработки деталей на станках применяется МГО деталей, при котором детали классифицируются по видам основной обработки (токарная, револьверная, фрезерная и др.) Однако с внедрением в производство сложных, многофункциональных обрабатывающих центров, все большее значение начинает иметь оснастка для этого оборудования. Далее детали каждого класса разделяются на группы деталей, сходных по форме и размерам и общности процесса их обработки. Затем разрабатывается технологический процесс не на отдельную деталь, а на группу деталей, технологически сходных и характеризующихся общей последовательностью обработки, одинаковым станком, приспособлением, режущим инструментом и наладкой [8].

Основные минусы метода заключается в сложности выявления групповой детали представителя и разработки группового технологического процесса, а, следовательно, повышенными требованиями к подготовке технологов. В связи с этим в работе по подготовке групповой обработки предлагается применение программного комплекса, способного автоматически

анализировать базу номенклатуры и предлагать оптимальную последовательность обработки деталей.

Если представить оперативное время как сумму затрат основного и вспомогательного времени [9]:

$$T_{оп} = T_{от} + T_{в}, \quad (1)$$

где $T_{от}$ – основное технологическое время, непосредственно затрачиваемое на изменения размеров и формы заготовки; $T_{в}$ – вспомогательное время, затрачиваемое на выполнение действий, обеспечивающих основную работу. То, применив МГО, можно уменьшить вспомогательное время, за счет чего сократится оперативное.

Вспомогательное время включает в себя продолжительность вспомогательных переходов на замену заготовки $t_{сп}$, замену инструмента $t_{ин}$, холостые перемещения, связанные с поворотом заготовки в шпинделе $t_{пх}$ и с подводом-отводом рабочих узлов $t_{хх}$, а также контроль в цикле обработки $t_{к}$:

$$T_{в} = t_{сп} + t_{ин} + t_{пх} + t_{хх} + t_{к} \quad (2)$$

Таким образом, оперативное время на многооперационном станке выглядит:

$$T_{оп} = T_{от} + t_{сп} + \sum_{i=1}^{i=l} t_{ин} + \sum_{i=1}^{i=м} t_{пх} + \sum_{i=1}^{i=n} t_{хх} + \sum_{i=1}^{i=q} t_{к} \quad (3)$$

где l, m, n, q – числа, не совмещенных вспомогательных переходов.

Из этого следует, что уменьшив хотя бы одно из слагаемых $T_{оп}$ можно сократить время изготовления детали на станке. А уменьшив вспомогательное время, можно увеличить производительность оборудования и время, затрачиваемое на основные технологические операции связанные непосредственно с изменением размеров и формы заготовки.

За счет классификации производственной номенклатуры и формирования оптимальной последовательности для обработки, можно сократить продолжительность вспомогательных переходов на замену заготовки $t_{сп}$ и замену инструмента $t_{ин}$. Предлагается для решения этой задачи использовать теорию кластерного анализа, предназначенного для разбиения множества объектов на заданное или неизвестное число классов на основании некоторого математического критерия качества классификации.

Пусть дано некоторое множество партий деталей. Каждая партия из этого множества описывается набором параметров.

Такими параметрами могут быть: конструктивный тип детали, количество деталей в партии, тип заготовки, масса и габаритные размеры деталей, материал, параметры технологических переходов (операций, комплексов операций), годовая программа выпуска, штучное время и т.д. Будем считать, что каждый из параметров идентифицируется некоторым числом. Поэтому, если рассматривается P параметров, тогда точки $x = (x_1, x_2 ... x_k)$, где x_k – k-й параметр партии деталей, лежит в евклидовом пространстве R^P размерности P. В этом случае естественно назвать точку $x \in R^P$ изображением этой партии.

Партии $x^1, x^2 ... x^n$ называются равными, если их соответствующие параметры совпадают. Задача заключается в разбиении множества партий $x^1, x^2 ... x^n$ на попарно непересекающиеся группы, число n которых конечно. Очевидно, что максимальное число групп, на которые можно разбить последовательность изображений $x^1, x^2 ... x^n$ равно общему числу партий деталей в рассматриваемом множестве, то есть каждая партия образует группу. Минимальное же число групп равно единице, то есть все детали находятся в одной группе.

Между любыми двумя изображениями x^1 и x^2 можно найти расстояние (метрику) – $d(x^1, x^2)$, которое, как числовая функция, должна удовлетворять следующим аксиомам:

- $d(x, y) \geq 0$, причем $d(x, y) = 0$ тогда и только тогда, когда $x = y$ (неотрицательность расстояния);
- $d(x, y) = d(y, x)$ – (симметричность расстояния);
- $d(x, y) \leq d(x, z) + d(z, y)$ – (неравенство треугольника) [10].

Узловым моментом в кластерном анализе считается выбор метрики (или меры близости объектов), от которого решающим образом зависит окончательный вариант разбиения объектов на группы при заданном алгоритме разбиения. Для этого существует много математических подходов, имеющих различное практическое применение. Так же способы различаются количеством учитываемых параметров, которых чем больше, тем точнее получаются расчеты [11; 12]. В каждой конкретной задаче этот выбор производится по-своему, с учетом главных целей исследования, физической и статистической природы используемой информации и др. В некоторых случаях выбор метрики достигается с помощью специальных алгоритмов преобразования исходного пространства признаков.

Кластеризация баз данных номенклатуры была применена в разработке автоматизированной системы группирования (АСГ) [13] деталей типа тел вращения. В качестве механообрабатыва-

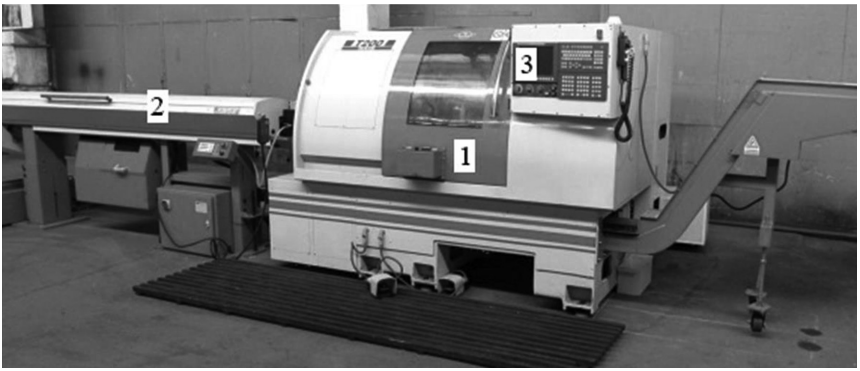

Рис. 1. ГПМ ОАО Хабаровского судостроительного завода: 1 – токарно-фрезерный станок Т200 с двенадцатипозиционной револьверной головкой; 2 – пруткоподающее устройство SNS42; 3 – панель оператора ЧПУ Fanuc 0i

ющего оборудования для обработки этих деталей используется токарно-фрезерный гибкий производственный модуль (ГПМ) [14] на основе токарного станка Т200 с ЧПУ Fanuc 0i и пруткоподающим устройством SNS42, установленный на Хабаровском судостроительном заводе (см. рис. 1). На станке установлена двенадцатипозиционная револьверная головка, что ограничивает количество операций с разным инструментом до 12-и. Максимальный диаметр прутка, подаваемого в шпиндель станка, ограничен до 40 мм.

В качестве критериев кластеризации служат различные характеристики деталей в партиях [15]. Учитывая, что внутри каждой партии детали одинаковые, первым признаком было выбрано k – количество деталей в партии. Чем больше партия, тем приоритетней она в очереди обработки, т.к. смена инструмента и перезагрузка пруткоподающего устройства при обработке одинаковых деталей в партии минимальна. Кроме того стоит заметить, что при обработке единичных коротких деталей зачастую целесообразней закрепление их напрямую в шпиндель станка, минуя подающее устройство. Однако при обработке разных единичных партий с достаточно схожими характеристиками появляется возможность их групповой обработки. И чем дольше партия находится в конце пополняемого списка, тем больше вероятность того, что она будет объединена в кластер с технологически подобными. Поэтому в кластеризации участвуют партии, состоящие даже из 1 детали. Следовательно, диапазон значений k был ограничен количеством деталей от 1

(минимальное значение деталей в партии) до 10 000 штук. Максимальное значение завышено для мелкосерийного производства в целях повышения адаптивности системы.

Следующим критерием стало количество режущего инструмента – *o*, применяемого для изготовления детали. Чем больше значение *o*, тем ближе партия к концу списка, так как увеличивается шанс того, что в партии может потребоваться дополнительная оснастка, которой в данный момент не установлено. Количество режущего инструмента ограниченно числом слотов для державок в револьверной головке станка, т.е. двенадцатью позициями. Для изготовления детали из подаваемого прутка необходимо минимум 3 слота (радиально-приводная державка, служащая стопором подачи заготовки; державка с токарно-проходным резцом; державка с отрезным резцом, для отрезания от прутка готовой детали).

Далее каждому материалу был присвоен классификационный номер – *m*, соответствующий стандарту взаимозаменяемости предприятия. Согласно которому все обрабатываемые детали можно условно разделить на 17 групп. Например: группа 1 – детали из высоколегированных (высокохромистых) сталей ферритного класса с содержанием хрома от 12 до 30% (08Х13, 08Х17Т, 15Х25, 15Х25Т, 15Х28); 2 – детали из легированных сталей мартенситного класса с содержанием хрома от 4 до 10% (15Х5, 15Х5М, 15Х5М-У, 15Х5ВФ, Х8, 12Х8, 12Х8ВФ, Х9М, 20Х5МЛ, 20Х5ВЛ, 20Х5ТЛ, 20Х8ВЛ); 3 – детали из сплавов титана (ВТ1-0, ВТ1-00, ПТ1М, ОТ4-0). Партии, объединенные в одну группу можно изготовить из любого материала входящего в нее. Следовательно, при анализе номенклатуры партии с одинаковым значением могут быть объединены в один кластер. Однако применение этого признака будет бессмысленным, без учета диаметра прутка-заготовки.

Значит, четвертой характеристикой партии будет габаритный диаметр заготовки – *g*, для изготовления партии деталей. Партии с равными значениями диаметра заготовки в очереди будут рядом и должны обрабатываться последовательно. Если диаметр деталей в партии отличаются на 1...4 мм (т.е. 2 мм на сторону), то эти детали так же должны располагаться рядом. Максимальной диаметр прутка ограничен пропускной способностью пруткоподающего устройства (40 мм), а минимальный – конструкцией кулачков шпинделя (в нашем случае 5 мм). И соответственно, этот признак не имеет смысла, без учета материла заготовок – *m*.

В итоге, точка D имеет 4 задаваемых признака, по которым ее можно кластеризовать:

$$D(k;\ o;\ m;\ g) \tag{4}$$

Математически, множество таких точек можно представить как массив с размерностью, равной количеству партий D. При этом каждой партии принадлежит 4 параметра, по которым происходит анализ:

$$\begin{array}{c} D_1 \\ D_2 \\ \\ D_n \end{array} \begin{bmatrix} k_1 & o_1 & m_1 & g_1 \\ k_2 & o_2 & m_2 & g_2 \\ & \dots & & \\ k_n & o_n & m_n & g_n \end{bmatrix} \tag{5}$$

где n – порядковый номер партии. Т.е. первый столбец – номер партии; второй столбец – количество деталей в партии; третий – количество применяемой оснастки; четвертый – группа материала; пятый – габаритный диаметр заготовки. Массив необходимо отсортировать последовательно по 2-му столбцу (наибольший приоритет), затем по 4-му и 5-му, после чего по 3-му [16]. Упрощенная блок-схема алгоритма показана на

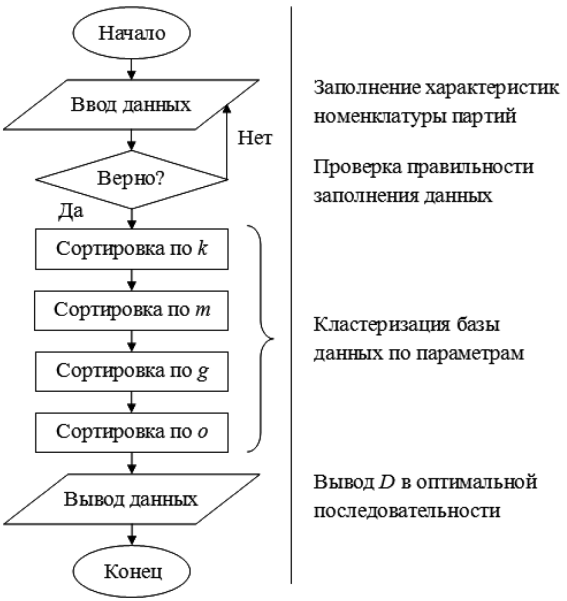

Рис. 2. Блок-схема алгоритма кластеризации

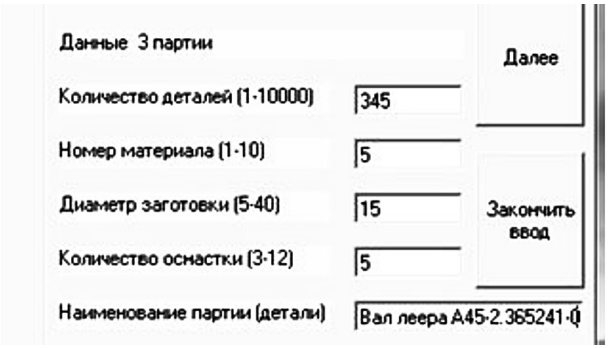

Рис. 3. Процесс ввода данных в программу

рис. 2. Каждая следующая сортировка проходит при неизменности предыдущей сортировки, то есть в границах одинаковых значений предыдущей сортировки. На вывод выдаются данные 1 столбца по порядку.

Для разработки АСГ использовался Visual Basic 6.0 и сортировка вставками. На рис. 3 представлено окно, в котором технолог вводит характеристики партий деталей стоящих в производственном плане. На выходе получается более эффективная последовательность обработки. Так как схожие детали обрабатываются друг за другом, то при таком подходе максимально сокращается продолжительность вспомогательных переходов на замену заготовки $t_{сп}$ и замену инструмента $t_{ин}$ [17].

Данный метод повышения производительности был испытан на предприятии в течение года. Как показал опыт, применение МГО позволяет в условиях единичного и мелкосерийного производства широко использовать групповые настройки станков, обеспечивающие специализацию рабочих мест и, как следствие, значительно повысить производительность [18].

Для анализа результатов внедрения, была исследована выборка рабочих дней с января по июнь 2013 г. в штатном режиме обработки. И с июня по ноябрь 2013 г. с кластеризацией базы деталей. При этом тип загрузки ГПМ не менялся. Управляющая программа станка позволяет получать данные об основном технологическом времени в течение рабочего дня $T_{раб}$. Для упрощения обработки полученных данных принято:

$$T_{раб} = T_{оп} + k, \qquad (6)$$

где k – коэффициент, характеризующий не учитываемые оперативным временем операции.

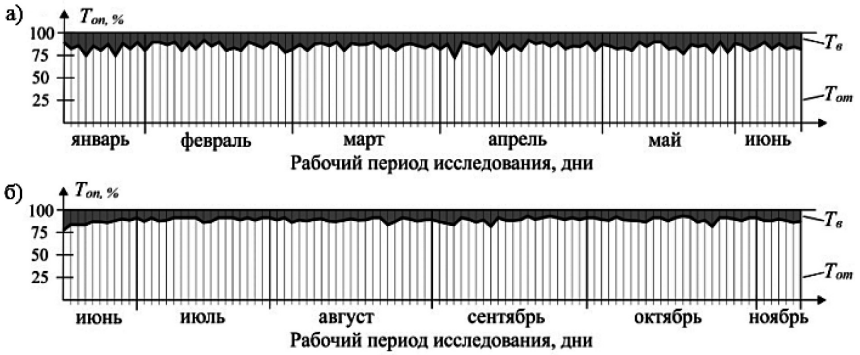

Рис. 4. Графики оперативного времени: а) в штатном режиме; б) с применением автоматизированной системы группирования деталей

На графиках (см. рис. 4) оперативное время представлено как процентное содержание вспомогательного и основного технологического времени. При этом видно, что в штатном режиме вспомогательное время каждый день резко меняется (от 9% до 28%). А на графике, показывающем изменение оперативного времени после внедрения автоматизированной системы группирования деталей вспомогательное время меняется сравнительно плавно (от 7% до 19%). Среднее вспомогательное время до внедрения 15,45%, а после 10,91%. Это на 4,54% меньше, что наглядно показывает преимущества оптимизации загрузки оборудования. А полученный в результате программный продукт позволяет значительно сократить время анализа номенклатуры деталей, ее типизации и построения оптимальной последовательности обработки деталей.

Из этого можно сделать вывод, что подобная разбивка деталей на кластеры по общности их характеристик с дальнейшим делением на укрупненные группы и классы, обеспечивает возможность составления такого технологического процесса при изготовлении деталей малыми партиями, при котором их изготовление осуществляется наиболее рационально и экономично.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Тимирязев В. А.*, *Кутин А. А.*, *Схиртладзе А. Г.* Основы технологии машиностроения. – М.: МГТУ «Станкин», 2011. – 295 с.

2. ГОСТ 14004-83. Технологическая подготовка производства. Термины и определения основных понятий. – М.: Стандартинформ, 2003. – 7 с.

3. Mukherjee I., *Ray P. K.* A Review of Optimization Techniques in Metal Cutting Processes // Computers and Industrial Engineering, 2006. T. 50 (1), pp. 15–34.

4. *Rao R. V.* Advanced Modeling and Optimization of Manufacturing Processes // Springer Series in Advanced Manufacturing.1st ed. London: Springer, 2011. 448 p.

5. *Babu D. M.*, *Kumar M. S.*, Vishnuu J. Optimization of cutting parameters for CNC turned parts using taguchi's technique // Hunedoara: Annals of faculty engineering Hunedoara – international journal of engineering, 2012. T. 10, pp. 493–496.

6. *Туровец О. Г.*, *Родионова В. Н.* Генезис бережливого производства // Организатор производства. – 2015. – № 2 – С. 5–12.

7. *Митрофанов С. П.* Групповая технология машиностроительного производства. В 2-х т. – Л.: Машиностроение, 1983. – 786 с.

8. *Бруштейн Б. Е.*, *Дементьев В. И.* Токарное дело. Изд. 6, перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1967. – С. 385.

9. *Тимирязев В. А.*, *Вороненко В. П.*, *Схиртладзе А. Г.* Основные технологии машиностроительного производства. Учебник для вузов / Под ред. В. А. Тимирязева. – СПб.: Лань, 2012. – 442 с.

10. *Давыдов В. М.*, *Кузнецов Д. И.* Ранжирование технологических признаков деталей нейросетевыми методами / Сборник трудов отделения Российской инженерной академии. Вып.1. – Владивосток: ДВГУ, 1998. – С. 123–129.

11. *Alwaise A. M.*, Usubamatov R., *Zain Z. M.* Optimization of Multi-Tool Machining Process // Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 2011. T. 5 (9), pp. 2111–2119.

12. *Usubamatov R.*, *Ismail K. A.*, *Sah S. B.* Mathematical Models for Productivity and Availability of Automated Lines // International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013. T. 66, pp. 59–69.

13. *Машиностроение*. Энциклопедия в сорока томах / Под ред. К. В. Фролова. Раздел III: Технология производства машин. Том III-3: Технология изготовления деталей машин. – М.: Машиностроение, 2002. – С. 637–642.

14. *Ковшов А. Н.* Технология машиностроения: Учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов. – М.: Машиностроение, 1987. – 320 с.

15. *Khvorov I. A.*, *Davydov V. M.*, *Basov V. Y.* System of cluster analysis of best sequence processing of nomenclature of parts for FMS // Modern materials and technologies. – 2013. – pp. 121–125.

16. *Тимирязев В. А.*, *Хворов И. А.* Технологии кластеризации баз данных в механообработке / XXVI международная инновационно-ориентированная конференция молодых ученых и студентов МИКМУС-2014 (Москва, 17–19 декабря 2014 г.). – М.: Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, 2015. – С. 442–444.

17. *Хворов И. А.*, *Каймин В. Г.*, *Сабиров Ф. С.* Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016613313, 24.03.2016. Программа для кластеризации заданной базы токарной номенклатуры. 2016.

18. *Оголобин А. Н.* Основы токарного дела. Изд. 3 / Под ред. Г. А. Глазова. – Л.: Машиностроение, 1974. – 310 с. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Хворов Иван Александрович[1] – аспирант,
e-mail: mr.khvorov@gmail.com,
Тимирязев Владимир Анатольевич[1] – доктор технических наук,
профессор, e-mail: timwa38@mail.ru,
Каймин Вячеслав Геннадьевич[1] – аспирант,
Дудко Сергей Викторович[1] – аспирант,
[1] Московский государственный технологический университет
«Станкин».

Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2017. No. 3, pp. 250–261.

UDC 004.896

I.A. Khvorov, V.A. Timiryazev, V.G. Kaimin, S.V. Dudko

INCREASE PRODUCTIVITY LATHES MACHINING CENTERS DUE TO THE CLUSTERING OF WORKPIECES IN SMALL BATCH PRODUCTION

When production of parts in small batches having a large loss of time due to the readjustment of the equipment during the transition from one party to another. To resolve this problem, used the science basis of Group components processing method proposed in the 60-ies of Russian scientist the S. P. Mitrofanov. The main disadvantage of this method lies in the increased requirements to the training of technologists, engaged in the development of group process and group identification details of the representative. However, due to the wide introduction of high-performance and cheap computers in manufacturing, recently a significant development has been the scientific direction of the Automation technologists. One of these methods is clustering databases of the machined parts. Automatic classification of the production item and the formation of optimal sequence of processing, improves the efficiency of metalworking equipment. This paper proposes a mathematical model of clustering the database according to four criteria: the number of parts in party; the number of cutting tools; diameter and material the workpiece. This model was applied in the development of automated system the grouping of parts of rotation. Received the software, which has been implemented on the production cycle of the machining plot with a flexible production module. The ratio of auxiliary and main time showed, that the hardware processing party details in the proposed software product sequence, increases the productivity of the machine. The method showed to the reduction average time in auxiliary transitions for the replacement of the workpiece and the tool.

Key words: automation, algorithm, machining, operation, cluster analysis, turning, mathematical model, rotation detail, Group components processing, flexible processing module.

AUTHORS

Khvorov I.A.[1], Graduate Student, e-mail: mr.khvorov@gmail.com,
Timiryazev V.A.[1], Doctor of Technical Sciences, Professor,
e-mail: timwa38@mail.ru,
Kaimin V.G.[1], Graduate Student,
Dudko S.V.[1], Graduate Student,
[1] Moscow State University of Technology «STANKIN»,
127055, Moscow, Russia.

REFERENCES

1. Timiryazev V. A., Kutin A. A., Skhirtladze A. G. *Osnovy tekhnologii mashinostroeniya* (Fundamentals of mechanical engineering, Moscow, MGTU «Stankin», 2011, 295 p.

2. Tekhnologicheskaya podgotovka proizvodstva. Terminy i opredeleniya osnovnykh ponyatiy. GOST 14004-83 (Technological preparation of production. Terms and definitions of basic concepts. State Standart 14004–83), Moscow, Standartinform, 2003, 7 p.

3. Mukherjee I., Ray P. K. A Review of optimization techniques in metal cutting processes. *Computers and Industrial Engineering*, 2006. T. 50 (1), pp. 15–34.

4. Rao R. V. Advanced modeling and optimization of manufacturing processes. *Springer Series in Advanced Manufacturing*. 1st ed. London: Springer, 2011. 448 p.

5. Babu D. M., Kumar M. S., Vishnuu J. Optimization of cutting parameters for CNC turned parts using taguchi's technique. *Hunedoara: Annals of faculty engineering Hunedoara international journal of engineering*, 2012. T. 10, pp. 493–496.

6. Turovets O. G., Rodionova V. N. *Organizator proizvodstva*. 2015, no 2, pp. 5–12.

7. Mitrofanov S. P. *Gruppovaya tekhnologiya mashinostroitel'nogo proizvodstva*, v 2-kh t. (Group technology machine-building production, in 2 vol.), Leningrad, Mashinostroenie, 1983, 786 p.

8. Brushteyn B. E., Dement'ev V. I. *Tokarnoe delo*. Izd. 6 (Turnery, 6th edition), Moscow, Vysshaya shkola, 1967, pp. 385.

9. Timiryazev V. A., Voronenko V. P., Skhirtladze A. G. *Osnovnye tekhnologii mashinostroitel'nogo proizvodstva*. Uchebnik dlya vuzov. Pod red. V. A. Timiryazeva (Basic technology of engineering production. Textbook for high schools. Timiryazev V. A. (Ed.)), Saint-Petersburg, Lan', 2012, 442 p.

10. Davydov V. M., Kuznetsov D. I. *Sbornik trudov otdeleniya Rossiyskoy inzhenernoy akademii*. Vyp. 1 (Proceedings of Department of Russian engineering academy, issue 1), Vladivostok, DVGU, 1998, pp. 123–129.

11. Alwaise A. M., Usubamatov R., Zain Z. M. Optimization of multi-tool machining process. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 2011, vol. 5 (9), pp. 2111–2119.

12. Usubamatov R., Ismail K. A., Sah S. B. Mathematical models for productivity and availability of automated lines. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, vol. 66, pp. 59–69.

13. *Mashinostroenie*. Entsiklopediya v 40 t. Pod red. K. V. Frolova. T. III-3 (Mechanical engineering. Encyclopedia in 40 vol. Frolov K. V. (Ed.), vol. III-3), Moscow, Mashinostroenie, 2002, pp. 637–642.

14. Kovshov A. N. *Tekhnologiya mashinostroeniya*: Uchebnik dlya vuzov (Mechanical engineering: Textbook for high schools), Moscow, Mashinostroenie, 1987, 320 p.

15. Khvorov I. A., Davydov V. M., Basov V. Y. System of cluster analysis of best sequence processing of nomenclature of parts for FMS. *Modern materials and technologies*. 2013. pp. 121–125.

16. Timiryazev V. A., Khvorov I. A. *XXVI mezhdunarodnaya innovatsionno-orientirovannaya konferentsiya molodykh uchenykh i studentov MIKMUS-2014* (Moskva, 17–19 dekabrya 2014 g.) XXVI international innovation-oriented conference of young scientists and students MIKAS-2014 (Moscow, December 17–19, 2014)), Moscow, Institut mashinovedeniya im. A.A. Blagonravova RAN, 2015, pp. 442–444.

17. Khvorov I. A., Kaymin V. G., Sabirov F. S. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2016613313* (Copyright certificate RU 2016613313), 24.03.2016.

18. Ogolobin A. N. *Osnovy tokarnogo dela*. Izd. 3. Pod red. G. A. Glazova (The basics of turning the case, 3rd edition, Glazov G. A. (Ed.)), Leningrad, Mashinostroenie, 1974, 310 p.