

Методическая база выбора станков с ЧПУ в условиях многопредметного производства

М. В. Вартанов, О. М. Шкода

Дан краткий анализ существующих методик выбора технологического оборудования в машиностроении и их недостатков, возникающих при использовании станков с ЧПУ. На примере работы цеха ПАО АК «РУБИН» выполнены расчет необходимого количества станков с ЧПУ и планировка технологической системы.

Ключевые слова:

машиностроительное производство, технологический комплекс, расчет количества оборудования, эффективный фонд времени

УДК 621 | ВАК 2.5.6

DOI: 10.22184/2499-9407.2022.28.3.66.71

Анализ методик выбора технологического оборудования в машиностроении

Многономенклатурный характер современного производства формирует высокую неопределенность в отношении условий выбора технологического оборудования. Если в момент утверждения технического задания на проектирование технологического комплекса (ТК) производственная программа может считаться известной, то за время эксплуатации, измеряемой годами, она может измениться существенно.

Так как выбор оборудования влияет на все параметры технологической системы (включая строительные и энергетические), то возможные ошибки выбора приводят к существенным экономическим потерям. Таким образом, необходимость объективного расчета количества оборудования технологической системы или участка с учетом факторов неопределенности является актуальной.

Методика учета факторов производственной неопределенности при проектировании технологического комплекса должна иметь своей целью получение диапазонов прогнозируемых выходных параметров его работы (производственных мощностей, выраженных в часах или количестве изготавливаемых изделий) в зависимости от диапазонов варьирования параметров технологической системы. В первую очередь интерес представляет оценка загруженности оборудования.

Основным направлением решения проблемы выбора оборудования является создание методики, в которой взаимосвязано осуществляется проектирование маршрутных

технологических процессов изготовления деталей и выбор оборудования проектируемого комплекса из станков с ЧПУ с учетом их фактической работоспособности и факторов производственной неопределенности.

Анализ известных методик выбора технологического оборудования в машиностроении позволил выделить ряд ограничений [1, 4, 5, 6 и др.]:

- отсутствие единого методологического подхода к определению количества оборудования в технологии машиностроения, станкостроения и организации производства;
- отсутствие общей методики, включающей этапы разработки технологических процессов и выбора необходимого оборудования для проектируемого ТК;
- отсутствие методики, позволяющей учитывать при расчете необходимого количества оборудования все категории затрат времени работы ТК, включая затраты времени на наладочные процессы;
- отсутствие методики учета факторов производственной неопределенности при расчете необходимого количества оборудования проектируемых ТК.

Анализ причин невыполнения производственной программы или низкой загрузки станков

Невыполнение производственных программ выпуска деталей, закрепленных за технологическими комплексами

или участками из станков с ЧПУ, а также низкая загрузка станков являются следствием:

- недостаточно обоснованных рекомендаций о рациональных областях применения станков с ЧПУ;
- отсутствия методик расчета необходимого количества станков с ЧПУ, учитывающих специфику их функционирования в составе комплексов и структуру затрат времени функционирования;
- отсутствия достоверных данных о фактической работоспособности станков с ЧПУ.

Причина одновременного невыполнения плана или низкой загрузки станков обусловлена неправильным выбором оборудования, его групп, типов и количества. Одна из главных причин подобной ситуации в отсутствии знаний и понимания фактической работоспособности оборудования ТК и факторов, на нее влияющих.

Выбор оборудования проводят исходя из предположения, что действительный фонд времени его работы полностью расходуется на производство продукции. Результатами такого выбора при изготовлении деталей на станках с ЧПУ являются невыполнение производственных программ выпуска деталей плановой номенклатуры или низкая загрузка станков (рис. 1). Время производительной работы станка с ЧПУ в составе современного комплекса не превышает 30–50% от его действительного фонда времени.

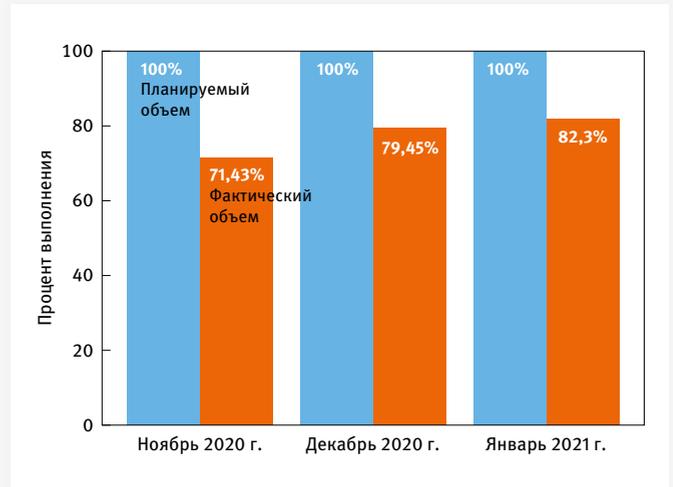


Рис. 1. Невыполненная номенклатура деталей класса «диск» в цехе № 45 ПАО АК «РУБИН»

Расчет эффективного фонда времени

В технологии машиностроения [1] принято относить все затраты времени к одной детали или партии деталей (табл. 1). Время на переналадку при этом учитывают внутри подготовительно-заключительного периода

Таблица 1. Зависимости, рекомендованные для определения необходимого количества оборудования проектируемой технологической системы

| № | Расчетная формула | Обозначения | Источник |
|---|--|---|----------|
| 1 | $C'_p = \frac{T_{сз}}{\Phi_0}$ | C'_p – расчетное число станков при непоточном производстве (детальное проектирование); $T_{сз}$ – суммарная станкоемкость обработки годового количества деталей, обрабатываемых на участке на станках данного типоразмера; Φ_0 – эффективный годовой фонд времени станка | [2] |
| 2 | $N_{ст} = \frac{T_{ст}}{\Phi_{до} \cdot K_3}$ | $N_{ст}$ – количество станочного оборудования; $T_{ст}$ – общая годовая трудоемкость станочных работ, ч; K_3 – коэффициент загрузки оборудования; $\Phi_{до}$ – действительный годовой фонд времени оборудования, ч | [3] |
| 3 | $Q_p = \frac{T}{\Phi_3}$ | Q_p – расчетное количество оборудования, не работающего в принудительном ритме; T – трудоемкость механической обработки годового выпуска продукции, станко-часов; Φ_3 – эффективный годовой фонд времени работы оборудования, ч | [4] |
| 4 | $N = \frac{t \cdot V}{60 \cdot T \cdot \varepsilon}$ | N – количество необходимого оборудования, шт.; T – количество рабочих часов в день, ч; V – требуемый объем производства, шт.; t – время обработки на каждой операции (минут на штуку); ε – эффективность операции | [5] |
| 5 | $Q_{pi} = \frac{\Pi_i \cdot t_{шт}}{\Phi_d \cdot 60}$ | $t_{шт}$ – время обработки детали на i -й операции, мин; Φ_d – действительный фонд времени работы оборудования в расчетном году, ч; Π_i – годовая программа выпуска изделий по плану, шт. | [6] |
| 6 | $n_0 = \frac{T_{го}}{\Phi_{до} \cdot \eta_{и}}$ $n_0 = \frac{C_{гр} + C_{гн}}{\Phi_{до} \cdot \Pi_{и}}$ | n_0 – количество оборудования, связанного с ручным или машинно-ручным трудом, шт.; $T_{го}$ – годовая трудоемкость работ, чел.-час; $\Phi_{до}$ – действительный годовой фонд времени оборудования, час / год; $\eta_{и}$ – коэффициент использования оборудования во времени; $C_{гр}$ – годовая станкоемкость работ, выполняемых на оборудовании данного вида, станко-часов; $C_{гн}$ – годовой объем наладок оборудования, станко-часов | [7] |

и, по сложившейся традиции, считают величиной незначительной по сравнению со временем обработки партии деталей. Технические и организационные простои в работе оборудования при расчетах учитывают только неизбежные потери (время технического и организационного обслуживания).

Многономенклатурность производства предполагает частые отладки и переналадки оборудования, что в целом характерно для ТК из универсальных станков.

Длительность наладки для подобного оборудования мала, поскольку отладка состоит только из установки приспособления и инструмента. При расчете количества такого оборудования время отладки учитывают через значение подготовительно-заключительного времени, которое обычно незначительно.

Это объясняет, почему в методиках расчета необходимого количества оборудования наладочные процессы традиционно не учитывают. Однако для станков с ЧПУ подобный подход недопустим.

Расчет количества станков с ЧПУ на участке (на примере ПАО АК «РУБИН»)

При определении количества оборудования без учета производственных неопределенностей возможны ошибки двух видов [8]:

1. Выбор количества оборудования, которое в дальнейшем окажется недостаточным для обеспечения измененной производственной программы, что приведет к необходимости дополнительных, не предусмотренных бизнес-планом инвестиций или образованию «узких мест» в ТК.
2. Выбор избыточного количества оборудования приведет к его недогруженности и неэффективности инвестиций.

Так как выбор оборудования влияет практически на все параметры ТК, включая строительные и энергетические, возможные ошибки выбора приводят к существенным экономическим потерям. Методика учета факторов производственной неопределенности при проектировании ТК должна определять диапазоны прогнозируемых выходных параметров работы ТК (производственных мощностей, выраженных в часах или количестве изготавливаемых изделий) в зависимости от диапазонов варьирования параметров самого ТК [8, 11].

За достаточно протяженный период любой из станков в составе ТК в рамках планового действительного фонда времени ($\Phi_{до}$) будет периодически находиться в одном из состояний затрат календарного времени:

1. Первичных наладок ($\sum \theta_2$) на изготовление нового комплекта деталей, которые ранее не изготавливались. Сюда входят доработка и отладка управляющих программ, подбор и установка комплектов инструментов и оснастки, их настройка, выполнение проб-

ных рабочих ходов с необходимыми корректировками, изготовление и контроль «первых деталей». Процесс повторяется для каждой из деталей комплекта:

$$\sum \theta_2 = T \cdot K_2,$$

где $\sum \theta_{2(чпу)}$ – время первичной отладки станка с ЧПУ на изготовление детали партии; K_2 – коэффициент пропорциональности между временем первичной отладки и временем цикла изготовления детали на станке с ЧПУ.

2. «Возвратных» переналадок ($\sum \theta_3$) в пределах сроков выпуска конкретного изготавливаемого комплекта, что и является важнейшим признаком многономенклатурного переналаживаемого производства; переналадки любых станков независимы друг от друга:

$$\sum \theta_3 = \sum_1^m T_i \cdot K_3 \cdot n,$$

где $\sum \theta_{3(чпу)}$ – длительность возвратных переналадок; K_3 – коэффициент пропорциональности между временем единичной переналадки станка на заготовку, которая ранее уже обрабатывалась («возвратная переналадка») и временем рабочего цикла; n – количество деталей в партии.

Основные затраты времени в рамках первичных отладок – это время написания и коррекции программ и время изготовления пробных деталей.

Временные потери на изготовление брака при годовом объеме $Z_{год}$ и доле брака α , составят:

$$\sum \theta_4 = \sum_1^q \left(T_i \cdot K_3 + \frac{T_i}{\eta_{ис}} \right) \cdot \infty \cdot Z_{год} = \sum_1^q T_i \left(K_3 + \frac{1}{\eta_{ис}} \right) \cdot \infty \cdot Z_{год},$$

где $\eta_{ис}$ – вероятность возникновения технических и организационных простоев; K_3 – коэффициент пропорциональности между временем единичной переналадки станка на заготовку, которая ранее уже обрабатывалась («возвратная переналадка») и временем рабочего цикла; T_i – длительность рабочих циклов станка.

Ситуация на рассматриваемом объекте (цех 45 АК «РУБИН»)

На основе анализа производственной статистики, а именно машинного времени, можно определить необходимое количество станков, требуемых для выполнения заданного плана работ.

Статистические данные собранные на участке, а именно машинное время, были получены с помощью Microsoft Office Excel 2013, для удобства и дальнейших расчетов по вышеприведенным формулам. Результаты расчетов сведены в табл. 2.

Таблица 2. Статистика машинного времени на рассматриваемом объекте

| № | $T_{\text{маш.}}$, с | N | $T_{\text{маш.}}$, МИН | T -партии, МИН | № | $T_{\text{маш.}}$, с | N | $T_{\text{маш.}}$, МИН | T -партии, МИН | № | $T_{\text{маш.}}$, с | N | $T_{\text{маш.}}$, МИН | T -партии, МИН |
|----|-----------------------|-----|-------------------------|------------------|----|-----------------------|-----|-------------------------|------------------|----|-----------------------|-----|-------------------------|------------------|
| 1 | 0,3 | 24 | 18 | 432 | 17 | 0,27 | 10 | 16,2 | 162 | 33 | 5,41 | 20 | 324,6 | 6 492 |
| 2 | 0,05 | 25 | 3 | 75 | 18 | 0,32 | 19 | 19,2 | 364,8 | 34 | 0,15 | 15 | 9 | 135 |
| 3 | 0,4 | 15 | 24 | 360 | 19 | 0,3 | 20 | 18 | 360 | 35 | 0,56 | 15 | 33,6 | 504 |
| 4 | 0,14 | 12 | 8,4 | 100,8 | 20 | 0,2 | 3 | 12 | 36 | 36 | 5 | 9 | 300 | 2 700 |
| 5 | 0,4 | 8 | 24 | 192 | 21 | 0,25 | 3 | 15 | 45 | 37 | 0,27 | 9 | 16,2 | 145,8 |
| 6 | 0,3 | 4 | 18 | 72 | 22 | 0,35 | 5 | 21 | 105 | 38 | 0,3 | 4 | 18 | 72 |
| 7 | 0,4 | 10 | 24 | 240 | 23 | 0,8 | 9 | 48 | 432 | 39 | 1,1 | 5 | 66 | 330 |
| 8 | 1,8 | 8 | 108 | 864 | 24 | 0,9 | 9 | 54 | 486 | 40 | 0,38 | 16 | 22,8 | 364,8 |
| 9 | 0,4 | 4 | 24 | 96 | 25 | 0,2 | 16 | 12 | 192 | 41 | 0,5 | 16 | 30 | 480 |
| 10 | 1,8 | 3 | 108 | 324 | 26 | 0,31 | 15 | 18,6 | 279 | 42 | 0,4 | 11 | 24 | 264 |
| 11 | 0,4 | 3 | 24 | 72 | 27 | 0,05 | 3 | 3 | 9 | 43 | 1,03 | 22 | 61,8 | 1 359,6 |
| 12 | 0,25 | 12 | 15 | 180 | 28 | 0,15 | 8 | 9 | 72 | 44 | 0,042 | 3 | 2,52 | 7,56 |
| 13 | 0,2 | 12 | 12 | 144 | 29 | 0,08 | 9 | 4,8 | 43,2 | 45 | 0,3 | 5 | 18 | 90 |
| 14 | 0,13 | 30 | 7,8 | 234 | 30 | 0,3 | 10 | 18 | 180 | 46 | 0,12 | 6 | 7,2 | 43,2 |
| 15 | 0,29 | 8 | 17,4 | 139,2 | 31 | 0,27 | 17 | 16,2 | 275,4 | | | | | |
| 16 | 0,27 | 1 | 16,2 | 16,2 | 32 | 0,2 | 26 | 12 | 312 | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | Итого: | 19 710 |

В условиях рассматриваемого участка цеха 45 при работе в две смены, станок в среднем может работать в месяц около 21 тыс. мин (22 рабочих дня).

К итоговой сумме затрачиваемого времени на обработку всех деталей следует добавить время первичных наладок и возвратных переналадок:

$$T = 19\,762,56 + (2 \cdot 46) = 19\,854,56 \text{ мин.}$$

Из табл. 2 видно, что трудоемкость двух смен составляет 19 710 мин. Следовательно, для выполнения данного количества деталей и промежуточных операций потребуется два станка. В настоящее время на данном участке имеется пять станков.

Разработка планировки технологической системы

Завершающие этапы проектирования ТК (рис. 3, 4) включают:

- проработку планировки ТК;

- определение взаимного расположения оборудования, транспортных и накопительных устройств и подсистем;
- оптимизацию размещения оборудования; проработку вопросов организации эксплуатации;
- технико-экономические расчеты;
- проверку соответствия полученных параметров ТК заданным в техническом задании ограничениям;
- принятие решений об утверждении структуры ТК или корректировке МТП изготовления деталей.

Применение универсальных наладок

Одним из путей повышения фактической работоспособности оборудования является применение универсальных наладок. Данная идея, лежащая в основе групповой технологии [9, 10], не получила широкого внедрения в производство. Основной причиной этому явилась сложность необходимой оснастки.

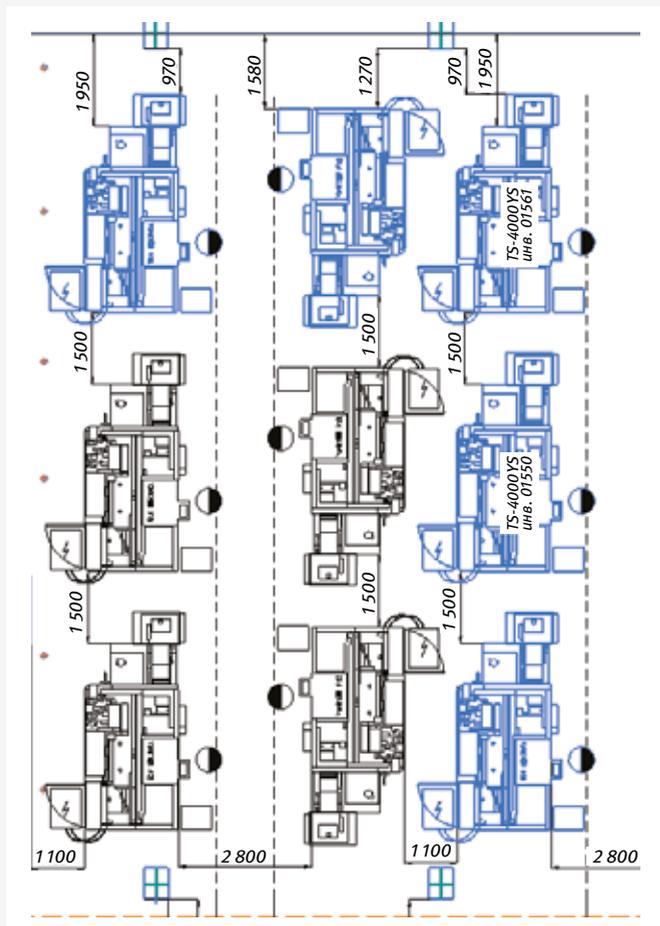


Рис. 3. Планировка участка токарно-фрезерных станков с ЧПУ, рассчитанная по предлагаемой методике без учета производственной неопределенности

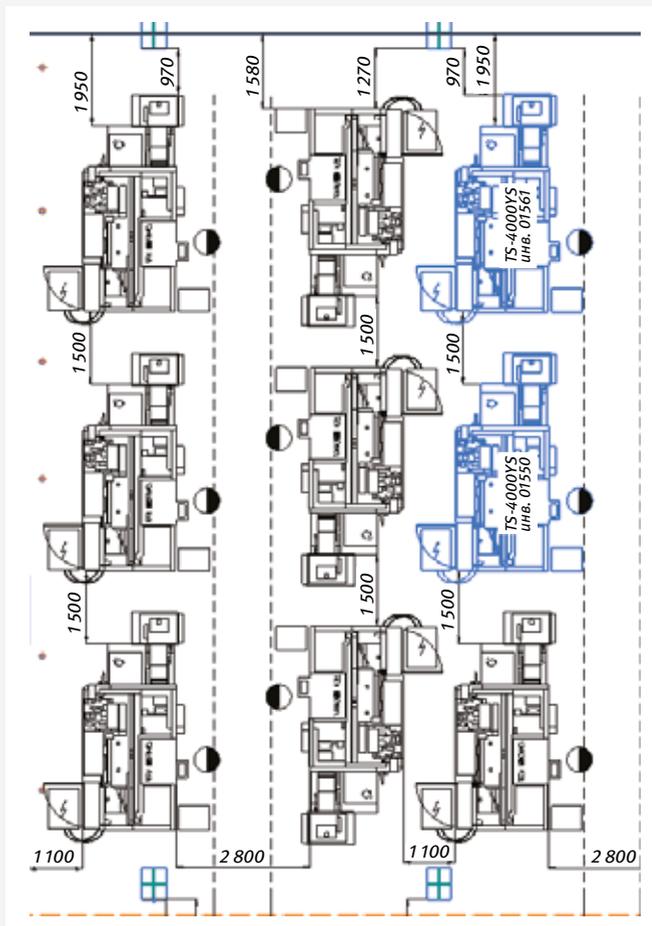


Рис. 4. Планировка участка токарно-фрезерных станков с ЧПУ, рассчитанная по предлагаемой методике при минимальных прогнозируемых программах выпуска



Рис. 5. Примеры деталей, объединяемых в группу

В настоящее время данную идею можно реализовать, создавая универсальные инструментальные наладки. В первую очередь универсальная инструментальная наладка позволит существенно сократить время возвратных переналадок, а при должной организации подготовки производства – и первичных переналадок.

Создание универсальных инструментальных наладок представляет собой сложную задачу. Емкость инструментальных магазинов современных станков с ЧПУ, достигающая сотен инструментов, позволяет начать разработку идеи универсальной инструментальной наладки на группу деталей, обрабатываемых на конкретном станке. Сократив номенклатуру необходимых инструментов возможно существенно сократить времена возвратных переналадок даже с учетом неизбежного возрастания основных времен.

Уменьшения возвратных переналадок можно достичь введением в конструкцию деталей специальных унифицированных базирующих элементов, которые позволят не менять приспособления при наладках внутри группы деталей, закрепленных за конкретным станком (рис. 5).

Также повысить интенсивность эксплуатации технологических систем за счет упрощения наладки обслуживания и его обслуживания в автоматизированном режиме, снизить затраты на изготовление специальных модулей в условиях инструментальных цехов машиностроительных предприятий можно путем создания модульных инструментальных наладок [12].

Возможности модульных инструментальных наладок, включают в себя следующие типы модулей:

- резцовые вставки, содержащие узлы крепления режущих пластин или резцов;
- модули осевой регулировки, предназначенные для обеспечения требуемого вылета инструмента;

Модульные конструкции инструментальных систем имеют эксплуатационные преимущества:

- высокую виброустойчивость;
- низкие затраты на устранение повреждений;
- низкую металлоемкость.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Вороненко В. П., Чепчуров М. С., Схиртладзе А. Г.** Проектирование машиностроительного производства: учебник / Под ред. В. П. Вороненко. СПб: Издательство «Лань», 2017. 416 с.
2. **Вороненко В. П.** Повышение эффективности сборочных машиностроительных производств путем обеспечения гибкости технологических процессов и структур подразделений: специальность 05.13.07: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Вороненко Владимир Петрович. М., 1997. 44 с.
3. **Мочунова Н. А.** Методика оптимизации процесса размещения ремонтных предприятий и СТО при проектировании // Доклады ТСХА: Материалы международной научной конференции, Москва, 05–07 декабря 2017 года. М.: Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К. А. Тимирязева, 2018. С. 322–324.
4. ОНТП 14-93 нормы технологического проектирования предприятий машиностроения, приборостроения и металлообработки (доработка ОНТП 14–93). Механообрабатывающие сборочные цехи. М., 1993. 91 с.
5. **Борисов С. Р., Васильев В. Н.** Основы предпринимательства и организации производства: Учеб. пособие. М.: Издательство Машиностроение, 2000. 752 с.
6. **Макконелл К. Р., Брю С. Л.** Экономикс. М.: Инфра-М, 2003. 983 с.
7. **Иванов В. П.** Проектирование производственных участков в машиностроении: Практикум. Минск: Техноперспектива, 2009. 223 с.
8. **Volchkevich I.** Estimation of the industrial uncertainty factors on selecting equipment configuration for designing machinery manufacturing production facilities // Advanced composite materials and technologies for aerospace applications (Proc. of 1st int. workshop). Wrexham, 2011. PP. 89–95.
9. **Ракунов Ю. П., Абрамов В. В.** Научно-методические основы технологической подготовки группового производства // Научные технологии и инновации, Белгород, 09–10 октября 2014 года / Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, 2014. С. 288–293.
10. **Жукова И. С.** Система организации группового производства на машиностроительных предприятиях: специальность 05.02.22 «Организация производства (по отраслям)»: диссертация на соискание ученой степени кандидата экономических наук. Воронеж, 2009. 223 с.
11. **Волчкевич И. Л.** Расчет необходимого количества оборудования проектируемых технологических комплексов в машиностроении с учетом факторов производственной неопределенности // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2011. № 10. С. 69–71.
12. **Маслов А. Р.** Модульные инструментальные наладки // СТАНКОИНСТРУМЕНТ. 2021. № 2 (023) С. 86–92.

Авторы

Вартанов Михаил Владимирович –

доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии и оборудование машиностроения» Московского политехнического университета

Шкода Олеся Михайловна –

магистр кафедры «Технологии и оборудование машиностроения» Московского политехнического университета