

УДК 621.914

## Оценка производительности многоцелевых станков с ЧПУ

**М.А. Фесенко, А.И. Кондаков**

МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

## Evaluation of Productive Capacity of CNC Machining Centers

**M.A. Fesenko, A.I. Kondakov**BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1

e-mail: kondakov1950@mail.ru, maksimfesenko@rambler.ru

**i** Многоцелевые станки с ЧПУ широко применяются в металлообработке. Повышение производительности многоцелевых станков с ЧПУ актуально для современного машиностроения, в особенности при малых объемах партий изготавливаемых на них деталей. Вместе с тем отсутствует единство взглядов на оценку их производительности. Традиционно применяемые критерии малоприспособны в условиях многономенклатурного производства и ограниченности его ресурсов. В статье предложены критериальный аппарат и методическое обеспечение, позволяющие оценивать производительность многоцелевого станка инвариантно предмету производства и ситуации оценки. Производительность рассматривается как мера эффективности использования производственных ресурсов при выполнении технологической операции. Представлен интегральный формальный критерий, применимый для оценки качества реализующихся на многоцелевых станках технологических решений. Возможно использование предложенного критериального аппарата для оптимизации структурно-параметрических характеристик технологических операций, выполняемых на многоцелевых станках с ЧПУ.

**Ключевые слова:** многоцелевой станок, производительность, многономенклатурное производство, производственный ресурс, технологическая операция.

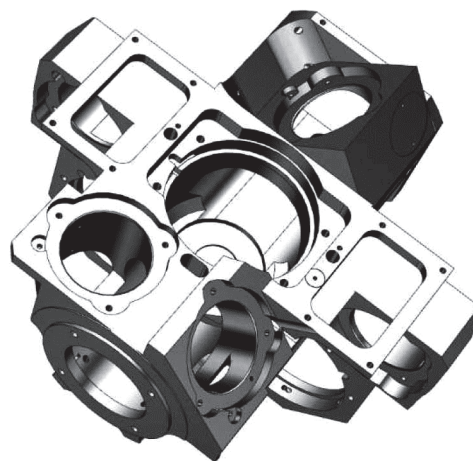
**i** CNC machining centers are widely used in metalworking. Increasing the productive capacity of CNC machining centers is very relevant in modern machine-building, especially where low volumes of parts are machined. However, there is no unity on how the productive capacity should be evaluated. The traditionally used criteria cannot be applied to multiproduct manufacturing and its limited resources. The authors propose a system of criteria and methodology that allows them to evaluate the machining center productive capacity invariantly to the object of manufacturing and assessment situation. The productive capacity is regarded as a measure of efficiency of using manufacturing resources when performing technological operations. An integrated, formal criterion is described that is suitable for evaluating the efficiency of the technological solutions used in the machining centers. The proposed system can be used for the optimization of the structural and parameter characteristics of the manufacturing operations performed on CNC machining centers.

**Keywords:** CNC machining center, productive capacity, multiproduct manufacturing, industrial resource, manufacturing operation.

В современном машиностроительном производстве постоянно расширяется применение высокоавтоматизированного металлорежущего оборудования, в частности многоцелевых станков (МС) с ЧПУ. Эти станки обладают большими технологическими возможностями как по составу реализуемых методов обработки, так и по числу одновременно управляемых координат исполнительных органов станков. На МС возможны обработка заготовок со сложными сочетаниями большого числа обрабатываемых поверхностей (рисунок), реализация операций с высокой концентрацией переходов, изготовление за один установ лезвийным инструментом поверхностей с точностью размеров IT5, IT6. Вместе с тем стоимость современных МС и их эксплуатации весьма высока, что существенно обостряет проблему эффективности их использования.

Традиционно одним из основных критериев эффективности принято считать производительность станка, под которой обычно понимают *штучную производительность* — количество продукции, производимой станком в единицу времени. *Штучная производительность* оценивается величиной, обратной штучному времени [1]. Однако такая оценка мало пригодна, например, для сравнения производительности станков, которые выполняют различающиеся по содержанию и сложности технологические операции. Сравнение по штучной производительности априори предполагает тождественность или конструктивную близость предметов производства, а также тождественность или близость содержания и технологической сложности выполняемых операций. Это снижает достоверность традиционной оценки производительности, в особенности в условиях современного машиностроительного производства, характеризующегося широкой номенклатурой изготавливаемых изделий и ее частым, практически непрерывным, обновлением. Выпускаемые изделия обладают различной конструктивной и технологической сложностью, что мешает объективно оценивать и сравнивать производительность используемого для их изготовления оборудования.

Существующие оценки производительности рабочих машин [1, 2] базируются на теории, согласно которой станок рассматривается изолированно и не учитываются его технологические, транспортные и прочие связи с другими станками исследуемой производственной си-



Корпусная деталь, изготавливаемая на МС

стемы. Между тем доказано [3], что, например, наладочные процессы оказывают прямое влияние на эффективность расходования временного ресурса производственной системы. В силу указанных причин отсутствует единство взглядов на оценку производительности МС [4–7].

Высокая стоимость и ограниченность средств технологического оснащения современного машиностроительного производства и иных ресурсов, необходимых для изготовления машин, обуславливают необходимость модернизации научно-методического подхода и критериального аппарата оценки и сравнения производительности основного технологического оборудования, в частности МС.

В научно-технической литературе [8–10] все большее распространение получает оценка производительности как отношения объема выпуска производимых изделий к затратам ресурсов всех видов (в финансовом выражении), используемых при их изготовлении. Указанный подход позволяет связать меры расходования как временных, так и любых материальных ресурсов в едином интегральном критерии.

Изготовление деталей партиями неизбежно приводит к непроизводительным потерям временного ресурса (фонда времени) станка, связанным прежде всего с выполнением его первичных наладок при переходе на изготовление каждой последующей партии деталей.

Трудоемкость обработки  $j$ -й партии заготовок на МС

$$T_j = t_{штj}N_j + (T_{п.з})_j, \quad (1)$$

где  $t_{штj}$  — норма штучного времени операции, выполняемой на МС для заготовок  $j$ -й партии,

нормочас;  $N_j$  — объем  $j$ -й партии, шт.;  $(T_{п.з})_j$  — норма подготовительно-заключительного времени для перехода к обработке заготовок  $j$ -й партии, нормочас.

Суммарная трудоемкость обработки (за фиксированное календарное время)  $J$  партий заготовок

$$T = \sum_{j=1}^J T_j. \tag{2}$$

При эксплуатации МС в составе производственной системы возникают и иные потери его временного ресурса, не являющиеся неизбежными и характеризующие эффективность технологических решений, уровни диспетчирования и технологической дисциплины в производственной системе. К таким потерям можно отнести, например, время ожидания заготовок, время, затрачиваемое на возвратные (повторные) переналадки, и др. [3].

Затраты временного ресурса (фонда времени) станка можно разделить на:

- а) производительные (основное время);
- б) непроизводительные — все иные затраты времени.

Непроизводительная часть штучного времени (вспомогательное время, время технического и организационного обслуживания, время регламентированных перерывов в работе) является неизбежной и обязательной. При правильно выполненном нормировании для конкретных фиксированных условий выполнения операции она вряд ли может быть ощутимо уменьшена. Для сокращения вспомогательного времени требуется повышение эффективности технологических решений и, как правило, увеличение затрат на технологическую подготовку производства.

Долю производительных затрат в годовом фонде времени станка характеризует коэффициент экстенсивного использования:

$$k_{э.и} = \frac{1}{\Phi_d} \sum_{j=1}^J t_{опj}, \tag{3}$$

где  $\sum_{j=1}^J t_{опj}$  — суммарное оперативное время (сумма основного и вспомогательного времени) работы МС за год;  $J$  — число партий заготовок, обработанных на МС за год;  $\Phi_d$  — действительный годовой фонд времени МС при заданном режиме работы производственной системы.

С относительной погрешностью не более 20 %

$$k_{э.и} \approx \frac{1}{\Phi_d} \sum_{j=1}^J t_{штj}, \tag{4}$$

где  $\sum_{j=1}^J t_{штj}$  — суммарное штучное время работы МС за год, затраченное на обработку  $J$  партий заготовок.

Согласно [3], для участков и цехов, в которых эксплуатируется оборудование с ЧПУ, при производстве единичного и серийного типов значение  $k_{э.и}$  составляет в среднем 0,35...0,40.

Для отдельного станка при обработке партии одинаковых заготовок, единственной наладке и отсутствии иных непроизводительных потерь времени

$$k_{э.и} \approx \frac{t_{шт}}{t_{шт-к}} = \frac{T - T_{п.з}}{T}, \tag{5}$$

где  $t_{шт}$ ,  $t_{шт-к}$  — штучное и штучно-калькуляционное время при обработке партии соответственно;  $T$  — суммарная трудоемкость обработки партии заготовок;  $T_{п.з}$  — подготовительно-заключительное время операции.

При наличии иных непроизводительных потерь времени  $T_{п}$ :

$$k_{э.и} = \frac{T - T_{п.з}}{T + T_{п}}. \tag{6}$$

Для отдельного станка за фиксированный период  $T_k$  календарного времени

$$k_{э.и} = \frac{T_k - T_{п}}{T_k}, \tag{7}$$

где  $T_{п}$  — суммарные непроизводительные потери временного ресурса станка за период  $T_k$ .

Эксплуатация МС связана с многочисленными затратами, характеризующими расходование производственных ресурсов, в частности: зарплатой основных и вспомогательных рабочих; амортизационными отчислениями на оборудование и технологическую оснастку; затратами на ремонт оборудования, электроэнергию, режущий инструмент, содержание производственных площадей и др.

Суммарные затраты усредняются и легко приводятся к затратам  $Z_0$ , отнесенным к единице времени, руб./ч. Значение  $Z_0$  индивидуально для каждого станка и для большей части МС составляет (в ценах 2015 г.) 1 400... 8 000 руб./ч.

С учетом сказанного предлагается оценивать производительность  $Q_{MC}$  станка по формуле

$$Q_{MC} = \frac{k_{э.и} \sum_{j=1}^J N_j}{3_0 \sum_{j=1}^J T_j}, \quad (8)$$

где  $\sum_{j=1}^J N_j$  — количество заготовок  $J$  партий, обработанных на МС в течение фиксированного календарного времени;  $k_{э.и}$  — значение коэффициента экстенсивного использования, точно или приближенно определяемое по формулам (3)–(6);  $3_0$  — затраты на использованные в течение календарного времени производственные ресурсы всех видов, отнесенные к единице времени, руб./ч.

Значение  $k_{э.и}$  в (8) определяют по формуле

$$k_{э.и} = \frac{\sum_{j=1}^J t_{штj} N_j}{\sum_{j=1}^J T_j + \sum_{j=1}^J T_{пj}}, \quad (9)$$

где  $t_{штj}$  — штучное время при обработке заготовок  $j$ -й партии;  $\sum_{j=1}^J T_{пj}$  — суммарные непроизводительные потери времени при обработке  $J$  партий заготовок.

Оценивая производительность МС при обработке одной операционной партии заготовок, значение  $k_{э.и}$  целесообразно учитывать лишь при наличии иных, кроме затрат времени на первичную наладку, непроизводительных потерь времени. В противном случае в формуле (8) можно принять  $k_{э.и} = 1$ , так как затраты времени на первичную наладку учитываются в штучно-калькуляционном времени  $t_{шт-к}$  и, соответственно, трудоемкости  $T$  обработки партии заготовок. Тогда формула (8) преобразуется к виду

$$Q_{MC} = \frac{1}{3_0 t_{шт-к}},$$

или

$$Q_{MC} = \frac{N}{3_0 T},$$

где  $N$  — объем операционной партии, шт.

При обработке на МС заготовок сложных корпусных деталей (см. рисунок), имеющих габаритные размеры 250...500 мм, нормы как штучного, так и подготовительно-заключительного времени могут составлять 1,0...7,0 ч при объемах партии до 20 шт. При обработке на МС партий заготовок объемом более 90 шт. максимальное влияние на результирующую оценку производительности МС затрат времени на первичную наладку не превышает 10...15 %. При малых объемах партии эти затраты при оценке производительности следует учитывать обязательно.

*Пример.* Определить производительность МС при последовательной обработке двух партий заготовок корпусных деталей с объемами:  $N_1 = 10$  шт.;  $N_2 = 20$  шт. Для каждой партии  $T_{п.з} = 4$  ч. Значения штучного времени:  $t_{шт1} = 3,5$  ч;  $t_{шт2} = 2,25$  ч. Непроизводительные потери времени  $T_{п} = 2,5$  ч. Принять  $3_0 = 1500$  руб./ч.

По формуле (1) определяем трудоемкость обработки каждой партии заготовок:

$$T_1 = 3,5 \cdot 10 + 4 = 39 \text{ ч};$$

$$T_2 = 2,25 \cdot 20 + 4 = 49 \text{ ч}.$$

По формуле (9) вычисляем коэффициент экстенсивного использования:

$$k_{э.и} = \frac{3,5 \cdot 10 + 2,25 \cdot 20}{39 + 49 + 2,5} \approx 0,88.$$

Производительность МС, по формуле (8),

$$Q_{MC} = \frac{0,88(20+10)}{1500 \cdot 88} \approx 2 \cdot 10^{-4} \text{ 1/руб.}$$

При таком подходе к оценке производительности станка, в отличие от традиционного, производительность характеризуется ее выпуском продукции на единицу производственных затрат, что является объективной, формально получаемой оценкой эффективности практического применения МС.

## Выводы

1. Производительность МС — мера интегральной оценки эффективности использования производственных ресурсов при выполнении конкретной технологической операции, связанной с изготовлением детали (партии деталей), или для фиксированного периода календарного времени.

2. Критерий производительности может быть использован для оценки качества реали-

зующегося на МС проектного технологического решения. Формальный характер предложенного критерия позволяет применять его для оптимизации структурно-параметрических решений, связанных с разработкой операционной технологии для МС.

## Литература

- [1] Шаумян Г.А. *Комплексная автоматизация производственных процессов*. Москва, Машиностроение, 1973. 640 с.
- [2] Волчкевич Л.И. *Автоматизация производственных процессов*. Москва, Машиностроение, 2005. 380 с.
- [3] Волчкевич И.Л. Проблема рационального использования станков с ЧПУ в отечественной промышленности. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*, 2011, вып. 5, ч. 3, с. 48–53.
- [4] Шадский Г.В., Сальников В.С., Ерзин О.А. Проблемы эффективного использования многоцелевых станков в условиях многономенклатурного производства. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2008, № 1, с. 218–222.
- [5] Шеховцева Т.В. Анализ целесообразности использования станков с ЧПУ с учетом их производительности. *Матер. междунар. Молодеж. Науч. конф. XVIII Туполевские чтения*. Казань, Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2010, т. 1, с. 9–10.
- [6] Hansen R. Overall Equipment Effectiveness — A Powerful Production-Maintenance Tool for Increased Profits. Industrial Press Inc., 2001. 278 p.
- [7] Мартынов Р.С. Сокращение времени переналадки оборудования как фактор повышения эффективности использования материальных ресурсов на предприятии. *Вестник Саратовского государственного социально-экономического университета*. 2011, № 4, с. 87–90.
- [8] Варнеке Х., Буллингер Х.-Й., Хихерт Р., Фегеле А. *Расчет затрат для инженеров*. Москва, Альпина Бизнес Букс, 2008. 307 с.
- [9] Кайдзен Г., Имаи М. *Путь к снижению затрат и повышению качества*. Москва, Альпина Паблишерз, 2010. 340 с.
- [10] Чейз Р.Б., Джейкобс Ф.Р., Аквиланс Н.Дж. *Производственный и операционный менеджмент*. Москва, Вильямс, 2007. 1184 с.

## References

- [1] Shaumian G.A. *Kompleksnaia avtomatizatsiia proizvodstvennykh protsessov* [Integrated automation of production processes]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1973. 640 p.
- [2] Volchkevich L.I. *Avtomatizatsiia proizvodstvennykh protsessov* [Factory automation]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2005. 380 p.
- [3] Volchkevich I.L. Problema ratsional'nogo ispol'zovaniia stankov s ChPU v otechestvennoi promyshlennosti [The problem of rational utilization of CNC machinery in the domestic industry]. *Izvestiia Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskii nauki* [Proceedings of the TSU. Technical sciences]. 2011, iss. 5, pt. 3, pp. 48–53.
- [4] Shadskii G.V., Sal'nikov V.S., Erzin O.A. Problemy effektivnogo ispol'zovaniia mnogotselevykh stankov v usloviakh mnogonomenklaturnogo proizvodstva [Problems of effective use of multi-task machines in a multiproduct manufacturing]. *Izvestiia Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskii nauki* [Proceedings of the TSU. Technical sciences]. 2008, no. 1, pp. 218–222.
- [5] Shekhovtseva T.V. Analiz tselesoobraznosti ispol'zovaniia stankov s ChPU s uchetom ikh proizvoditel'nosti [An analysis of the feasibility of using the CNC in accordance with their performance]. *Materialy mezhdunarodnoi molodezhnoi nauchnoi konferentsii, 18 Tupolevskie chteniia* [Proceedings of the international youth conference, 18<sup>th</sup> Tupolev reading]. Kazan', KAI publ., 2010, vol. 1, pp. 9–10.
- [6] Hansen R. *Overall Equipment Effectiveness — A Powerful Production-Maintenance Tool for Increased Profits*. Industrial Press inc., 2001. 278 p.
- [7] Martynov R.S. Sokrashchenie vremeni perenaladki oborudovaniia kak faktor povysheniia effektivnosti ispol'zovaniia material'nykh resursov na predpriatii [Reducing changeover of

equipment time as a factor in increasing the efficiency of material resource use at enterprises]. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo sotsial'no-ekonomicheskogo universiteta* [Bulletin of the Saratov State Socio-Economic University]. 2011, no. 4, pp. 87–90.

- [8] Varneke Kh., Bullinger Kh., Khikhert R., Fegele A. *Raschet zatrat dlia inzhenerov* [Calculation of costs for engineers]. Moscow, Al'pina Biznes Buks, 2008. 307 p.
- [9] Kaidzen G., Imai M. *Put' k snizheniiu zatrat i povysheniiu kachestva* [The way to reduce costs and improve quality]. Moscow, Al'pina Publisher publ., 2010. 340 p.
- [10] Cheiz R.B., Ekvilain N.Dzh., Iakobs R.F. *Proizvodstvennyi i operatsionnyi menedzhment* [Production and Operations Management: Manufacturing and Services]. Moscow, Vil'iams publ., 2007. 1184 p.

Статья поступила в редакцию 23.06.2015

## Информация об авторах

**КОНДАКОВ Александр Иванович** (Москва) — доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: kondakov1950@mail.ru).

**ФЕСЕНКО Максим Александрович** (Москва) — аспирант кафедры «Технология машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: maksimfesenko@rambler.ru).

## Information about the authors

**KONDAKOV Aleksandr Ivanovich** (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Technology of Machine-Building. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: kondakov1950@mail.ru).

**FESENKO Maksim Aleksandrovich** (Moscow) — Post Graduate, Department of Technology of Machine Building. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: maksimfesenko@rambler.ru).



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана  
вышла в свет монография  
**В.М. Гремячкина**

### «Гетерогенное горение частиц твердых топлив»

Рассмотрены теоретические основы процессов горения частиц твердых топлив, к которым относят не только традиционные углеводородные топлива, содержащие углерод, но и частицы металлов, которые широко используют в качестве топлива в ракетных двигателях. Кроме того, выполнен анализ окисления и хлорирования частиц металлов в ряде технологических процессов химической промышленности, а также горения и газификации углеродных частиц в различных реакционных газах.

Для научных работников, инженеров, а также для студентов, интересующихся проблемами ракетной техники на твердых топливах, сжигания и газификации твердых органических топлив в энергетике.

**По вопросам приобретения обращайтесь:**

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.  
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;  
press@bmstu.ru; www.baumanpress.ru