

**Б.М. Горшков**, доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой «Сервис технических и технологических систем»  
*Поволжский государственный университет сервиса, Тольятти (Россия)*  
**И.А. Самарцев**, соискатель научной степени кандидата технических наук  
*Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)*

**Ключевые слова:** перекомпоновываемые производственные системы; автоматически сменный модуль; оборудование с ЧПУ; производительность.

**Аннотация:** В последние годы XX века – начала XXI века развитие станочных систем в машиностроении определяет следующее положение – машиностроение вошло в новую эру – эру мировой конкуренции, обусловленную значительно возросшей покупательной способностью потребителя. В связи с чем производители, стремясь увеличить свои доходы и привлечь большее количество покупателей, регулярно обновляют выпускаемую продукцию для соответствия научно-техническому прогрессу и требованиям потребителя. Именно постоянный рост тенденции смены выпускаемого продукта является одним из самых сложно выполняемых современными производственными системами условий.

Наиболее распространенные существующие производственные системы, такие как автоматические линии (АЛ) и гибкие производственные системы (ГПС), обладают рядом особенностей, не позволяющих им соответствовать современным требованиям.

Автоматические линии, обладая высокой производительностью (массовое производство), при переходе на выпуск новой номенклатуры изделий требуют значительных капиталовложений и сопровождаются длительными простоями. Гибкие производственные системы обладают меньшей производительностью (серийное производство) по сравнению с АЛ, но имеют значительную гибкость при переходе на выпуск новой продукции. Однако высокий уровень гибкости зачастую является избыточным и характеризует высокую стоимость ГПС.

В этой связи в настоящее время в машиностроении большое внимание уделяется разработке перекомпоновываемых производственных систем (ППС), систем, способных выпускать продукцию с производительностью массового производства и гибкостью ГПС.

Одной из наиболее важных и малоисследованных областей теории создания перекомпоновываемых производственных систем в России и за рубежом являются вопросы обеспечения и определения показателей производительности ППС.

Для современных производств характерно внедрение станочных систем, обеспечивающих быстросменность технологической базы, расширение номенклатуры выпускаемой продукции, сокращение времени на подготовку производства, с применением процессов многоместного и направленного воздействия источников дополнительной (например, тепловой, электрической) энергии в зону обработки. Результатом такой интеграции является переход от стационарных станочных систем с жесткой межагрегатной связью (РПЖ) к рабочим позициям переменной компоновки (ПРП) на основе применения автоматически сменных производственно-технологических модулей. Такие станочные системы более адаптированы к требованиям заказчика в условиях многономенклатурного производства. Перекомпоновываемые рабочие позиции (ПРП) являются самоконтролируемыми и саморегулируемыми мехатронными производственными системами, основным свойством которых является автоматическое изменение количества и наименования агрегатных узлов и модулей на всех ярусах [1; 2; 3; 4; 5; 6] (рис. 1).

Одним из малоисследованных вопросов создания ПРП является определение производительности. Исследование производительности позволяет определять влияние цикловых и внецикловых потерь рабочего времени на количество деталей, производимых в единицу времени.

Применение автоматически сменных узлов позволяет значительно сократить продолжительность остановов рабочей позиции (РП) на проведение технического

обслуживания (ТО) и ремонта узлов за счет автоматической смены необходимого узла на исправный.

Расчет производительности ПРП, основывается на общепринятой формуле расчета фактической производительности автоматической линии (формула 1) [2; 7; 8]:

$$Q_{ф.ал} = Q_{ц} \cdot \eta_{исп} = \frac{3600 \cdot p}{(t_{pi} + t_{xi})' + t_{мп.н} + \frac{1}{n_y} \cdot W} \quad (1)$$

где  $Q_{ц}$  – цикловая производительность лимитирующей рабочей позиции;

$\eta_{исп}$  – коэффициент использования оборудования;

$t_{pi}$  – время рабочих ходов рабочего цикла лимитирующей рабочей позиции;

$t_{xi}$  – время холостых ходов рабочего цикла лимитирующей рабочей позиции;

$t_{мп.н}$  – не совмещенное с рабочими и холостыми ходами время транспортно-загрузочных перемещений;

$\sum_1^q t_{ni}$  – суммарные внецикловые простои, приходящиеся на единицу продукции;

$q$  – количество рабочих позиций АЛ;

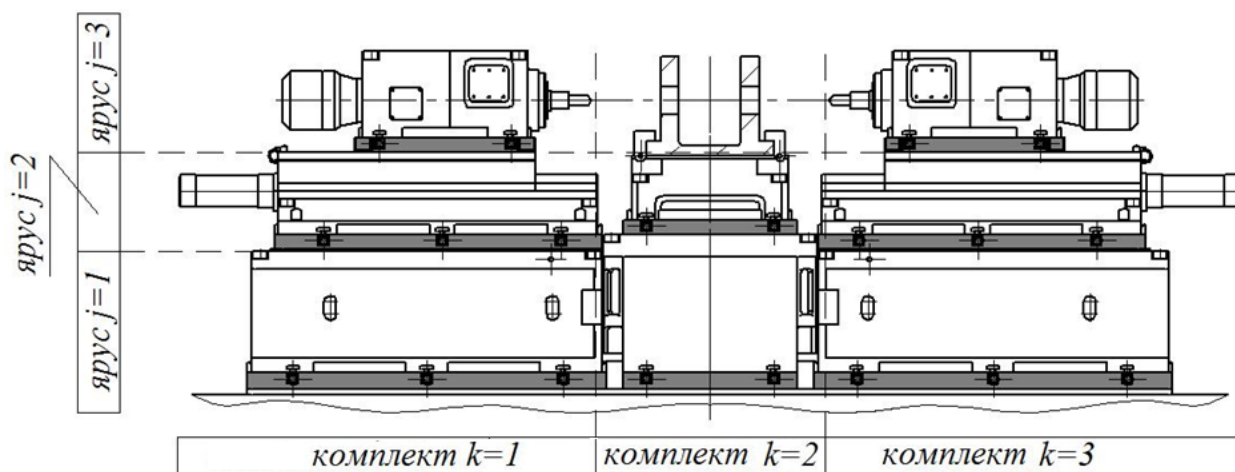


Рис. 1. Схема перекомпонованной рабочей позиции (ПРП)

$n_y$  – количество участков, разделенных накопителями;  
 $W$  – коэффициент возрастания простоев лимитирующего участка из-за неполной компенсации потерь накопителями;  
 $p$  – количество параллельных потоков оборудования.

Так как целью исследования является определение фактической производительности ПРП, формула 1 упрощается (параметры  $p$ ,  $W$ ,  $n_y$ ) необходимы для расчета производительности производственной системы) и принимает вид:

$$Q_{ф.РПЖ} = Q_{ц} \cdot \eta_{исп} = \frac{3600}{T + \sum t_n}, \quad (2)$$

где  $T = t_p + t_x + t_{тр.н}$ ;  $t_p$ ,  $t_x$ ,  $t_{тр.н}$  – соответственно, время рабочих ходов рабочего цикла, время холостых ходов рабочего цикла, не совмещенное с рабочими и холостыми ходами время транспортно-загрузочных перемещений;

$Q_{ф.РПЖ}$  – фактическая производительность рабочей позиции с жесткой межагрегатной связью (РПЖ);

$Q_{ц}$  – цикловая производительность рабочей позиции;

$\sum t_n$  – суммарные внецикловые простои, приходящие на единицу продукции.

В течение простоев рабочей позиции с жесткой межагрегатной связью ( $\sum \theta_n$ ) проводятся работы по ремонту и техническому обслуживанию агрегатных узлов [7]. Так как агрегатные узлы, komponующие рабочую позицию, имеют жесткую межагрегатную связь, работы по ТО и ремонту агрегатных узлов проводятся непосредственно на рабочей позиции.

Как показали проведенные исследования, в перекомпонованных рабочих позициях работы по ТО и ремонту автоматически сменных узлов проводятся вне ПРП, после процесса перекомпонования.

Таким образом, останов ПРП, связанный с проведением технического обслуживания или ремонта автоматически сменных узлов ( $t_{ПРП.oi}$ ), равен продолжитель-

ности перекомпонования  $j$ -го яруса ( $t_{нркj}$ ;  $t_{ПРП.oi} = t_{нркj}$ ), поэтому суммарная продолжительность остановов рабочей ( $\sum \theta_{о.ПРП}$ ) позиции равна суммарной продолжительности перекомпонований ПРП за исследуемый период по причине отказов автоматически сменных узлов ( $t_{ср.о}$ ) и ТО узлов и смены номенклатуры обрабатываемых изделий ( $t_{ср.сн}$ ), и соответственно, суммарная продолжительность остановов ПРП, приходящихся на единицу продукции, равна суммарной продолжительности перекомпонований, приходящихся на единицу продукции ( $\sum t_{нрк}$ ). Основываясь на формуле (2), была предложена зависимость для расчета фактической производительности ПРП:

$$Q_{ф.ПРП} = \frac{3600}{T + \sum t_{нрк}} \quad (3)$$

где  $\sum t_{нрк} = t_{ср.о} + t_{ср.сн}$ ;  $\sum t_{нрк}$  – суммарная продолжительность перекомпонований, приходящаяся на единицу продукции.

Суммарную продолжительность перекомпонований, приходящуюся на единицу продукции, находят как (4) – отношение суммарной продолжительности простоев РП, связанной с ТО  $\sum \theta_{ПРП.то}$ , ремонтом  $\sum \theta_{ПРП.р}$  узлов, а также сменой номенклатуры обрабатываемых изделий  $\sum \theta_{ПРП.сн}$ ;

$\sum \theta_{о.ПРП} = \sum \theta_{ПРП.то} + \sum \theta_{ПРП.р} + \sum \theta_{ПРП.сн}$  за исследуемый период  $\theta_u$  к числу обработанных деталей  $z_{ПРП}$  за рабочий период  $\theta_{р.ПРП}$ .

$$\sum t_{нрк} = \frac{\sum \theta_{о.ПРП}}{z_{ПРП}} \quad (4)$$

Суммарную продолжительность остановов  $\sum \theta_{o.ПРП}$  определяют из разности продолжительности исследуемого периода  $\theta_u$  и суммарной продолжительности рабочих периодов  $\sum \theta_{р.ПРП}$ ;

$\sum \theta_{o.ПРП} = \theta_u - \sum \theta_{р.ПРП}$ , где суммарная продолжительность рабочих периодов определяется по формуле

$$\sum \theta_{р.ПРП} = \theta_u - \sum \theta_{o.ПРП}.$$

Количество обработанных деталей  $z_{ПРП}$  определяют как отношение периода  $\sum \theta_{р.ПРП}$  и продолжительности рабочего цикла  $T$ . Выражение расчета  $z_{ПРП}$  принимает вид

$$z_{ПРП} = \frac{\sum \theta_{р.ПРП}}{T}.$$

Формула нахождения  $\sum t_{нрк}$  принимает вид:

$$\sum t_{нрк} = \frac{\sum \theta_{o.ПРП}}{\left(\frac{\theta_u - \sum \theta_{o.ПРП}}{T}\right)} \quad (5)$$

В зависимости от количества, наименования и конструкции автоматически сменных узлов число остановов  $n_{нрк}$  за исследуемый период будет различаться, соответственно, и суммарная продолжительность остановов  $\sum \theta_{o.ПРП}$  будет различной:

$$\sum \theta_{o.ПРП} = n_{нрк} \cdot t_{ср.ПРП}, \quad (6)$$

где  $n_{нрк}$  – количество перекомпонований ПРП;

$t_{ср.ПРП}$  – средняя продолжительность перекомпонования ПРП.

Методы определения продолжительности перекомпонования ПРП в зависимости от компоновки и расположения рассчитываются по формуле:

$$t_{ср.ПРП} = \frac{t_{ср.o} + t_{ср.сн}}{2}, \quad (7)$$

где

$$t_{ср.o} = \frac{\sum_1^j (T_{пер.o.j} \cdot N_{нрк.j} \cdot n_{y.j})}{N}$$

$$t_{ср.сн} = \frac{\sum_1^j \left( \frac{T_{xp}}{T_{сн.j}} \cdot n_{y.j} \cdot T_{пер.с.j} \right)}{\frac{T_{xp}}{T_{сн}}}$$

$t_{ср.o}$  – средняя продолжительность перекомпонования ПРП при проведении ремонта автоматически сменного узла;

$t_{ср.сн}$  – средняя продолжительность перекомпонования ПРП при смене номенклатуры обрабатываемого изделия и ТО автоматически.

Учитывая формулы 1–7, формула расчета фактической производительности ПРП, характеризующей количество изготавливаемых деталей в час, принимает вид:

$$Q_{ф.ПРП} = \frac{3600}{T + \frac{n_{нрк} \cdot t_{ср.ПРП}}{\left(\frac{\theta_u - n_{нрк} \cdot t_{ср.ПРП}}{T}\right)}} \quad (8)$$

Для определения влияния  $n_{нрк}$  на  $Q_{ф.ПРП}$  рассчитываем параметр  $Q_{ф.ПРП}$  и строим график (рис. 2а) изменения фактической производительности ПРП в зависимости от количества перекомпонований по причине ТО, ремонтов и смен номенклатуры обрабатываемых изделий ( $n_{нрк}$ ).

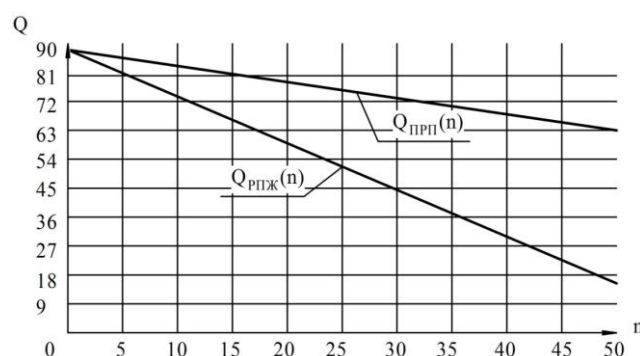


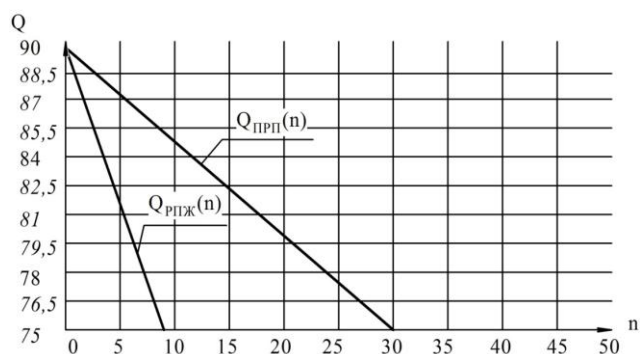
Рис. 2а. Производительность перекомпонованной рабочей позиции и рабочей позиции с жесткой межагрегатной связью

Для повышения информативности графика строим график зависимости  $Q_{ф.РПЖ}$  от количества простоев  $n_n$  за исследуемый период (используя значение средней продолжительности простоя РПЖ, рассчитанной при обработке данных хронометража РП АВТОВАЗа;  $Q_{ср.РПЖ} = 2,6363$  час). Зависимость  $Q_{ф.ПРП}$  и  $Q_{ф.РПЖ}$  от количества остановов и простоев рассчитываем за период, равный  $\theta_u = 10$  рабочим дням.

Для построения графика рассчитываем  $Q_{ф.ПРП}$  и  $Q_{ф.РПЖ}$  в зависимости от количества простоев РПЖ и перекомпонований ПРП ( $n_{нрк} = n_n = \{0,1,2,\dots,50\}$ ) (рис. 2а).

На рис. 2а отображено изменение фактической производительности рабочих позиций с жесткой и гибкой межагрегатной связью в зависимости от количества

остановов и простоев. Однако график  $Q_{ф.ПРП}$  при выбранном масштабе оси ординат представляет горизонтальную прямую. Для наглядного отображения изменения  $Q_{ф.ПРП}$  от количества отказов и перекомпоуований  $n$  изменим масштаб оси ординат  $\{0, \dots, 90\} \rightarrow \{75, \dots, 90\}$  (рис. 2б).



**Рис. 2б.** Производительность перекомпоуемой рабочей позиции и рабочей позиции с жесткой межагрегатной связью

Анализ результатов расчетов и приведенные зависимости на графиках (рис. 2а и 2б) показали, что влияние ТО, ремонта узлов и смены номенклатуры обрабатываемых изделий на фактическую производительность ПРП значительно меньше, чем на фактическую производительность РПЖ. Что говорит об увеличении производительности рабочих позиций с гибкой межагрегатной связью по сравнению с традиционными станочны-

ми системами благодаря сокращению внецикловых потерь рабочего времени.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горшков Б.М., Баранов А.Н. Повышение управляемости подвижного органа станка // Наука, техника, образование г. Тольятти и Волжского региона : межвузовский сборник научных трудов. Ч. 2. Тольятти, 2000. С. 9–12.
2. Горшков Б.М., Кергин А.Е., Ржевцев Г.Д. Методы диагностирования технических систем // Инновационные технологии в сервисе : сборник научных статей III Международной научно-практ. конференции. СПб., 2012. С. 148–149.
3. Царев А.М. Автоматические линии, средства автоматизации загрузки и транспортирования валов. Тольятти : ТолПИ, 1992. 89 с.
4. Царев А.М. Перекомпоуемые производственные системы – перспективное направление развития машиностроения. Тольятти : ТГУ, 2007. 156 с.
5. Царев А.М., Левашкин Д.Г. Перекомпоуемые производственные системы реконфигурируемого производства. Обеспечение жесткости автоматически сменных узлов призматической формы : монография. М. : Компания Спутник+, 2007. 304 с.
6. Царев А.М. Принципы построения модульных переоборудовываемых систем в машиностроении // Роботы и гибкие производственные системы. Куйбышев : Куйбыш. кн. изд-во, 1987. С. 39–42.
7. Волчкевич Л.И. Автоматы и автоматические линии. Ч. 1. Основы проектирования. М. : Высшая школа, 1976. 230 с.
8. Волчкевич Л.И. Надежность автоматических линий. М. : Машиностроение, 1969. 309 с.

### ESTIMATION OF OPERATIONAL EFFICIENCY OF RECONFIGURABLE WORKING STATION

© 2014

**B.M. Gorshkov**, doctor of technical sciences, professor  
*Volga Region State University of Service, Togliatti (Russia)*  
**I.A. Samartsev**, applicant for the degree of candidate of technical sciences  
*Togliatti state university, Togliatti (Russia)*

**Keywords:** reconfigurable manufacturing systems; automatic replacement module; CNC equipment; operational efficiency.

**Annotation:** At the end of the 20<sup>th</sup> century – at the beginning of the 21<sup>st</sup> century the development of machine tool systems is determined by the following condition – machine building has entered a new era – the era of world competition conditioned by significantly increased purchasing ability of a buyer. In this connection, the manufacturers, trying to increase their profit and attract more customers, regularly modernize products to comply with scientific-technological progress and consumer requirements. Steady increase of tendency to change of manufactured products is one of the hardest-to-carry out by modern production systems conditions.

The most widespread existing manufacturing systems, such as automatic lines (AL) and flexible manufacturing systems (FMS) have a number of features not allowing them to comply with the up-to-date requirements.

Automatic lines have high operational efficiency (mass production), and when switching to manufacture of a new range of products they require heavy capital outlays and involve long downtimes. Flexible manufacturing systems have lower efficiency (series production) compared to ALs, but they are rather flexible when switching to manufacture of new products. At the same time, the high level of flexibility is frequently excessive and determines the high cost of FMS.

In this connection, today great attention is paid in machine building to construction of reconfigurable manufacturing systems (RMS) – the systems able to manufacture products with operational efficiency of mass production and flexibility of FMS.

One of the most important and little-investigated areas of construction of reconfigurable manufacturing systems in Russia and abroad is the issues of assurance and evaluation of RMS operational efficiency indices.