

УДК 621.9.06-52

Д. О. Киселица, аспирант, А. Н. Михайлов, д-р техн. наук, проф.  
ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет» г. Донецк, ДНР,  
Россия  
Тел./Факс: +7 (949) 460 92 90, E-mail: [D\\_mitriy2404@mail.ru](mailto:D_mitriy2404@mail.ru)

## ЦИКЛОВАЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ И РЕЗЕРВЫ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ПОТОЧНО-ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

*В статье рассматриваются вопросы определения цикловой производительности поточно-пространственных технологических систем (ППТС) непрерывного действия. Показано, что цикловая производительность однозначно определяется структурой базовых технологических воздействий и временем полного кинематического цикла, включающего основное и вспомогательное время. Получены обобщённые аналитические зависимости для расчёта цикловой производительности поточно-пространственных технологических модулей (ППТМ) с мультипликативной и мультипликативно-аддитивной композицией базовых технологических воздействий при открытых и закрытых структурах аддитивной части. Проанализировано влияние структурных параметров, основного и вспомогательного времени на уровень цикловой производительности и коэффициент использования полного кинематического цикла. Выявлены основные резервы повышения производительности на уровне структурных решений, обеспечивающие интенсификацию технологических процессов при проектировании ППТС высокой и сверхвысокой производительности.*

**Ключевые слова:** цикловая производительность, поточно-пространственная технологическая система, основное время, вспомогательное время, коэффициент производительности, структурная модель.

D. O. Kiselitsa, A. N. Mikhailov

## CYCLICAL PRODUCTIVITY AND RESERVES FOR INCREASING THE PRODUCTIVITY OF CONTINUOUS FLOW SPATIAL TECHNOLOGICAL SYSTEMS

*The article discusses issues related to determining the cycle productivity of production flow technological systems (PFTS) based on rotary and rotary conveyor machines. It is shown that cycle productivity is unambiguously determined by the structure of basic technological actions and the time of a complete kinematic cycle, including main and auxiliary time. Generalized analytical dependencies have been obtained for calculating the cycle productivity of PPTM with a multiplicative and multiplicative-additive composition of basic technological influences for open and closed structures of the additive part. The influence of structural parameters, main and auxiliary time on the level of cycle productivity and the coefficient of utilisation of the complete kinematic cycle is analysed. The main reserves for increasing productivity at the level of structural solutions that ensure the intensification of technological processes in the design of high - and ultra-high-performance PPTS have been identified.*

**Keywords:** cycle productivity, flow-space technological system, main time, auxiliary time, productivity coefficient, structural model.

### 1. Введение

Большие возможности в решении проблемы интенсификации и автоматизации производственных процессов обеспечивает применение технологических систем непрерывного действия, выполненных на базе роторных и роторно-конвейерных машин, а также поточно-пространственных технологических систем (ППТС) и поточно-пространственных технологических модулей (ППТМ). Теория и практика создания этих машин позволила во многом снять остроту этой проблемы для массового производства изделий относительно мелких размеров и обрабатываемых по сравнительно простым технологиям [1, 2]. Кроме того, этот опыт является основой для дальнейшего развития исследований в этом направлении и совершенствования методов проектиро-

вания технологических систем, способных охватить более широкий класс изделий и пригодных для реализации сложных технологических процессов [3, 4].

Целью работы является исследование влияния структурных параметров и временных характеристик полного кинематического цикла на цикловую производительность ППТМ и выявление резервов повышения производительности ППТС на этапе структурного проектирования.

## 2. Общая часть работы

Проектирование ППТС всегда базируется на структуре технологического процесса. В процессе проектирования технологической системы, еще не имея структуры ППТС можно определить ее технологическую производительность в зависимости от мощности множества единичных технологических зон и основного (рабочего) времени технологического воздействия орудий и средств обработки на ПО [5, 6].

Вместе с тем, создаваемой ППТС полный кинематический цикл включает в себя не только затраты времени на технологическое воздействие орудий и средств обработки на ПО, но и вспомогательное время на зажим и разжим ПО в БТВ, подвод и отвод инструментов к ПО [2]. В этом случае, время полного кинематического цикла (рабочего цикла) будет следующее [3]:

$$T_{ци} = T_{oi} + T_{vi} \quad (1)$$

где  $T_{ци}$  – время полного кинематического цикла  $i$ -го ППТМ.

При этом время кинематического цикла и структура БТВ в ППТМ однозначно определяет цикловую производительность.

Цикловая производительность характеризует выпуск ПО в ППТС в условиях бесперебойной ее работы с заданной функциональной структурой и обычно определяется на стадии проектирования.

Общее уравнение для определения цикловой производительности ППТМ с мультипликативной композицией БТВ [6], имеет следующий вид:

$$P_{ци} = \frac{\prod_{k=1}^p v_{ik}}{T_{ци}} = \frac{\prod_{k=1}^p v_{ik}}{T_{oi} + T_{vi}}, \quad (2)$$

где  $P_{ци}$  – цикловая производительность  $i$ -го ППТМ.

Анализируя выражение (2) можно отметить, что на повышение цикловой производительности влияют следующие факторы:

1. Увеличение порядка (числа позиций)  $v_{ik}$  всех классов подсистем.
2. Увеличение количества классов  $P$  подсистем.
3. Уменьшение времени полного кинематического цикла  $T_{ци}$ .

Здесь, изменение первых двух факторов влияют на структуру ППТМ, а изменение третьего фактора приводит к интенсификации процесса обработки и функционирования ППТМ [6].

На рисунке 1 приведена зависимость цикловой производительности от времени полного кинематического цикла ППТМ. Графики представлены для ППТМ со следующими функционально-структурными моделями [5]:

1.  $Str_i^{(\phi)} = \bigwedge_{\eta_{i3}=1}^4 \bigwedge_{\eta_{i2}=1}^{10} \bigwedge_{\eta_{i1}=1}^{100} y_{i(\eta_{i3}, \eta_{i2}, \eta_{i1})}$ ,
2.  $Str_i^{(\phi)} = \bigwedge_{\eta_{i3}=1}^3 \bigwedge_{\eta_{i2}=1}^{10} \bigwedge_{\eta_{i1}=1}^{50} y_{i(\eta_{i3}, \eta_{i2}, \eta_{i1})}$ ,
3.  $Str_i^{(\phi)} = \bigwedge_{\eta_{i2}=1}^8 \bigwedge_{\eta_{i1}=1}^{100} y_{i(\eta_{i2}, \eta_{i1})}$ ,
4.  $Str_i^{(\phi)} = \bigwedge_{\eta_{i2}=1}^5 \bigwedge_{\eta_{i1}=1}^{50} y_{i(\eta_{i2}, \eta_{i1})}$ .

Кроме того, рост цикловой производительности возможен за счет изменения структуры полного кинематического цикла. Здесь за счет уменьшения вспомогательного времени производится увеличение цикловой производительности. Зависимость цикловой производительности ППТМ от вспомогательного времени приведена на рисунке 2 [5, 6].

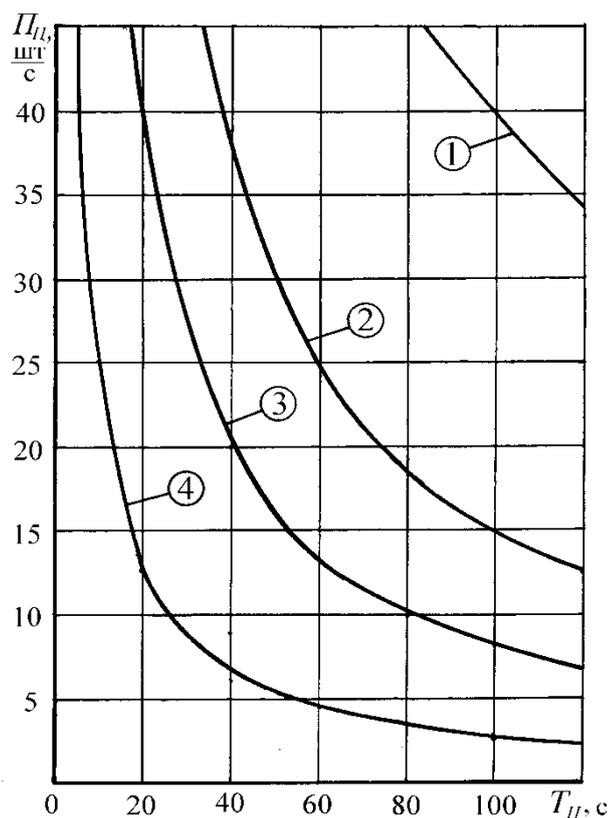


Рисунок 1. Зависимость цикловой производительности от времени полного кинематического цикла ППТМ для различных вариантов структурных решений

График 1 представлен для  $T_{oi} = 10$  с; графики 2, 4, 6, 7 – для  $T_{oi} = 20$  с; графики 3, 5 – для  $T_{oi} = 40$  с; При этом графики 1, 2, 3 представлены для ППТМ со следующей структурой:

$$Str_i^{(\phi)} = \bigwedge_{\eta_{i3}=1}^4 \bigwedge_{\eta_{i2}=1}^6 \bigwedge_{\eta_{i1}=1}^{100} y_{i(\eta_{i3}, \eta_{i2}, \eta_{i1})}$$

Графики 4, 5 составлены для функционально-структурной модели:

$$Str_i^{(\phi)} = \bigwedge_{\eta_{i3}=1}^4 \bigwedge_{\eta_{i2}=1}^6 \bigwedge_{\eta_{i1}=1}^{50} y_{i(\eta_{i3}, \eta_{i2}, \eta_{i1})}$$

График 6 представлен для следующей функционально-структурной модели:

$$Str_i^{(\phi)} = \bigwedge_{\eta_{i2}=1}^6 \bigwedge_{\eta_{i1}=1}^{100} y_{i(\eta_{i2}, \eta_{i1})}$$

График 7 приведен для функционально-структурной модели:

$$Str_i^{(\phi)} = \bigwedge_{\eta_{i2}=1}^6 \bigwedge_{\eta_{i1}=1}^{50} y_{i(\eta_{i2}, \eta_{i1})}$$

Следуя основным положениям теории производительности, анализ технологи-

ческого потенциала производительности ППТС следует осуществлять по коэффициенту производительности [5]:

$$\eta_i = \frac{\Pi_{Цi}}{\Pi_{Oi}}, \tag{7}$$

где  $\eta_i$  – коэффициент производительности  $i$ -го ППТМ;

$\Pi_{Oi}$  – технологическая производительность  $i$ -го ППТМ или цикловая производительность при  $T_{Bi}$  близком или равном нулю.

Здесь:

$$\Pi_{Oi} = \frac{\prod_{k=1}^p v_{ik}}{T_{Oi}}. \tag{8}$$

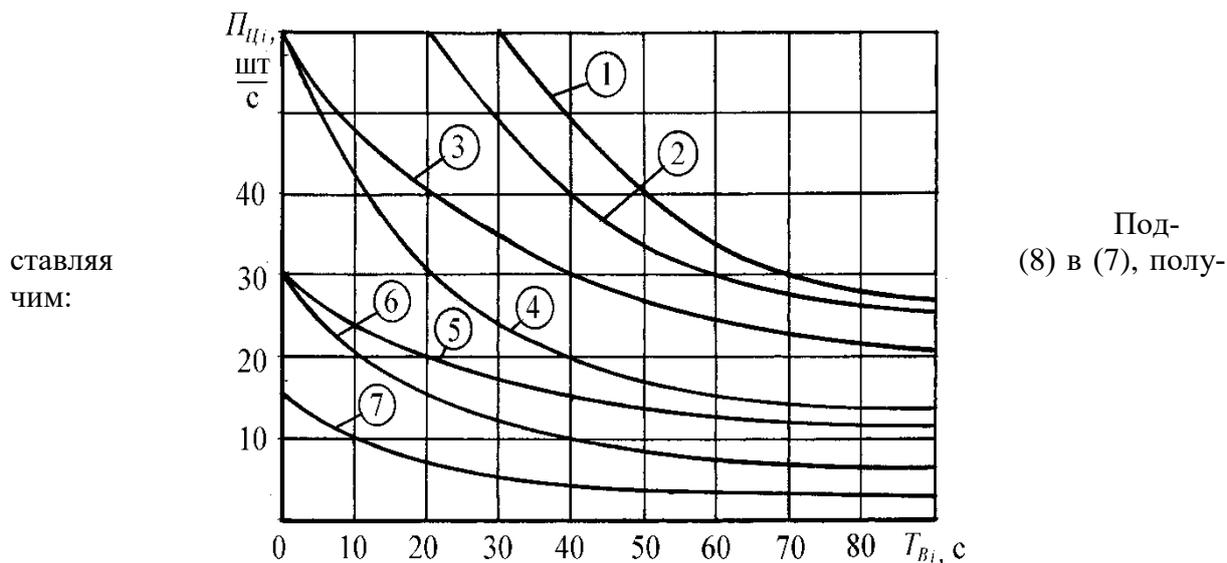


Рисунок 2. Зависимость цикловой производительности ППТМ от вспомогательного времени

$$\eta_i = \frac{T_{Oi}}{T_{Oi} + T_{Bi}} = \frac{1}{\varepsilon_i}, \tag{9}$$

где  $\varepsilon_i$  – коэффициент, характеризующий степени использования полного кинематического цикла  $i$ -го ППТМ.

Результаты расчетов коэффициента производительности в зависимости от основного времени рабочих ходов инструментов представлены на рисунке 3 для различных значений вспомогательного времени.

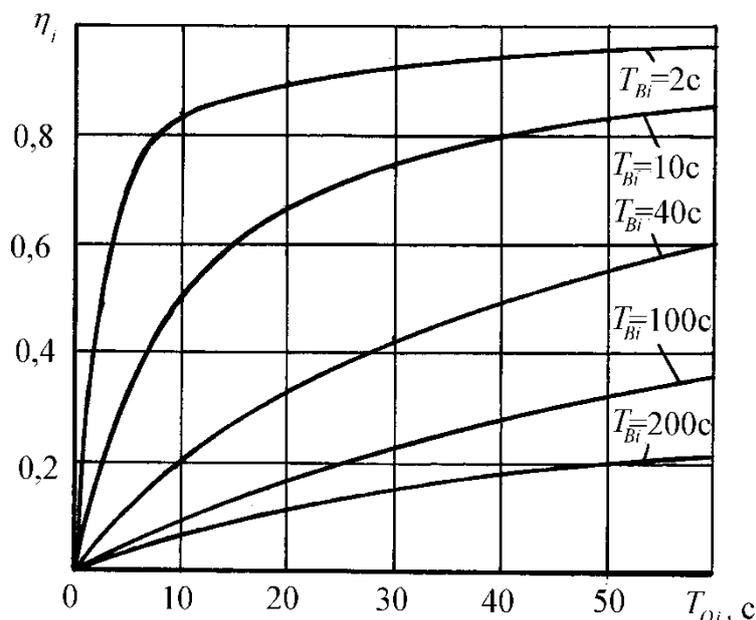


Рисунок 3. Влияние основного времени на коэффициент производительности

Проделав соответствующие преобразования в выражении и используя формулы (8) и (7), уравнение для определения цикловой производительности можно представить следующим образом [5]:

$$P_{ци} = \frac{\prod_{k=1}^p v_{ik}}{T_{O_i}} \eta_i = \frac{\prod_{k=1}^p v_{ik}}{T_{O_i} \varepsilon_i}. \tag{10}$$

Следует иметь в виду, что технологическая и цикловая производительности равны между собой и являются теоретической производительностью, которые определяются на соответствующих этапах проектирования ППТС. При этом технологическая производительность находится на этапе проектирования технологического процесса для ППТС, а цикловая производительность определяется непосредственно на этапе создания структуры и конструктивной реализации ППТС.

Любой ППТМ с мультипликативно-аддитивной композицией БТВ может иметь открытую или закрытую структуру аддитивной части ППТМ. В открытой структуре аддитивной части ППТМ ПО непрерывно подаются и перемещаются от элемента к элементу с одинаковым циклом  $T_{ци\eta_i}$ .

В закрытой структуре аддитивной части ППТМ ПО подаются после того, как предыдущие ПО полностью пройдет все элементы аддитивной части структуры ППТМ.

Цикловая производительность ППТМ с мультипликативно-аддитивной композицией блоков технологического воздействия (БТВ) при открытой структуре аддитивной части, определяется по формуле [6]:

$$P_{\text{ц}} = \frac{\prod_{k=2}^p v_{ik}}{T_{\text{ц}\eta_{i1}}} = \frac{\prod_{k=2}^p v_{ik}}{T_{\text{он}\eta_{i1}} + T_{\text{вн}\eta_{i1}}}, \quad (11)$$

где  $T_{\text{он}\eta_{i1}}$  – время рабочих ходов инструментов в БТВ или основное время технологического воздействия;

$T_{\text{вн}\eta_{i1}}$  – время холостых ходов инструментов в БТВ или вспомогательное время.

Для других структурных моделей ППТМ с мультипликативно-аддитивной композицией БТВ, являющихся промежуточными вариантами функционально-структурных моделей (5) и (3), цикловая производительность определяется аналогично приведенным выше рассуждениям.

Следует отметить, что при проектировании ППТМ с мультипликативно-аддитивной композицией БТВ обычно используется закрытая структура аддитивной части [4, 6].

### 3. Заключение

Проведенные исследования направлены на создание ППТС, предназначенных для реализации технологических процессов высокой и сверхвысокой производительности с объемно-пространственной структурой, являются вторым этапом проектирования ППТС и позволяют перейти к последующим этапам проектирования ППТС на более высоких уровнях абстрагирования.

### ЛИТЕРАТУРА:

1. Базров, Б. М. Основы технологии машиностроения: Учебник для вузов. – М.: Машиностроение, 2005. – 736 с.
2. Антимонов, А. М. Основы технологии машиностроения: учебник /.— Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2017.— 176 с.
3. Копылов, Ю. Р. Технология машиностроения: учебное пособие для вузов /.— 2-е изд., стер. — Санкт-Петербург: Лань, 2024. — 252 с.
4. Погонин, А. А. Технология машиностроения: учебник / А. А. Погонин, А. А. Афанасьев, И. В. Шрубченко. — 3-е изд., доп. — Москва: ИНФРА-М, 2022. — 530 с.
5. Михайлов, А. Н. Структура маршрутов и закономерности движений изделий в поточно-пространственных технологических системах. / А.Н. Михайлов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. - Донецк: ДонГТУ, 1998. Вып. 3. С.64-79.
6. Михайлов, А. Н. Основы синтеза поточно-пространственных технологических систем непрерывного действия / - Донецк: Технополис, 2002. - 379 с.

Поступила в редколлегию 20.05.2025 г.