

Методика оценивания результатов выбора оборудования проектируемых технологических комплексов машиностроительного производства

10, октябрь 2014

Волчкевич И. Л., Прохоренкова Е. В.

УДК: 658.512

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

vil@bmstu.ru

Актуальность проблемы

Ключевой концептуальной научной проблемой, решение которой способствует разработке современной научно-методической базы проектирования технологических комплексов (ТК) машиностроительного производства, является проблема выбора оборудования проектируемых ТК. Особую актуальность эта проблема имеет при проектировании комплексов из станков с ЧПУ. Так как выбор оборудования влияет практически на все параметры ТК, включая строительные и энергетические, возможные ошибки выбора приводят к существенным экономическим потерям. Причина часто возникающей на предприятиях машиностроения проблемы - одновременного невыполнения плана и низкой «загрузки» станков – именно в неправильном выборе оборудования, его групп, типов и количества. Одна из главных причин этого неправильного выбора – в отсутствии знаний и понимания фактической работоспособности оборудования ТК и факторов, на нее влияющих.

Постановка задачи и критерии сравнения вариантов

Любой ТК представляет собой целенаправленную систему, объединяющую технологические системы, основой каждой из которых является технологическое оборудование. Эффективность использования оборудования в значительной мере определяется долей времени его производительной работы в его действительном фонде времени. Собственно выбор оборудования ТК и оценивание его результатов являются многокритериальными задачами [1], не сводимыми к единственному критерию. Наиболее рациональным путем решения этих задач является сравнительный анализ, использование критериев предпочтения и проведение расчетов, подтверждающих преимущество того или иного варианта.

В частности, условиях переналаживаемого многономенклатурного производства, когда значимым является время исполнения заказа или поставки комплекта деталей на сборку, для сравнения вариантов предлагается использовать расчет цикла изготовления партии

деталей. Поскольку наибольшее количество проектов технического перевооружения предприятий в современных условиях связано с внедрением оборудования с ЧПУ, расчет направлен на сравнение цикла изготовления партии деталей на станке с ЧПУ с альтернативными вариантами.

В качестве альтернативных вариантов рассмотрены:

- Участок из универсальных станков, построенный по предметному принципу, на котором та же партия деталей изготавливается на ряде последовательных операций;
- Автоматическая линия, на которой те же детали изготавливаются на ряде последовательных позиций; возможны варианты автоматической линии с жесткой связью (АЛ) или переналаживаемой автоматической линии (ПАЛ).

Каждый из вариантов имеет свои особенности, которые определяют методику расчета цикла изготовления партии деталей.

Математическая модель

Поскольку обработка на станке с ЧПУ принята в качестве базы для сравнения, рассмотрим вариант использования его в составе участка с технологической специализацией. Детали на оборудовании данных группы и типа оборудования в составе технологически-специализированных участков изготавливаются партиями. Время цикла изготовления партии деталей будет включать в себя время первичной наладки и сумму времен изготовления всех деталей партии с учетом технической и организационной надежности. Тогда:

$$\sum \Theta_{1(\text{чпу})} = \frac{T_{(\text{чпу})}}{\eta_{\text{ис}(\text{чпу})}} \cdot N, \quad (1)$$

где $\sum \Theta_{1(\text{чпу})}$ - суммарное время изготовления деталей партии на станке с ЧПУ;

$T_{(\text{чпу})}$ - время цикла изготовления данной детали на станке с ЧПУ;

$\eta_{\text{ис}(\text{чпу})}$ - коэффициент использования времени межналадочных периодов станка с ЧПУ;

N - размер изготавливаемой партии.

$$\sum \Theta_{2(\text{чпу})} = T_{(\text{чпу})} \cdot K_2, \quad (2)$$

где $\sum \Theta_{2(\text{чпу})}$ - 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].

Суммарное время изготовления партии деталей составит:

$$\sum \Theta_{(\text{чпу})} = \sum \Theta_{1(\text{чпу})} + \sum \Theta_{2(\text{чпу})} = \frac{T_{(\text{чпу})} \cdot Z}{\eta_{\text{ис}(\text{чпу})}} + T_{(\text{чпу})} \cdot K_2, \quad (3)$$

или:

$$\sum \Theta_{\text{чпу}} = \frac{T_{(\text{чпу})}}{\eta_{\text{ис}(\text{чпу})}} \cdot (Z + K_2 \cdot \eta_{\text{ис}(\text{чпу})}). \quad (4)$$

В качестве объекта сравнения принят предметно-специализированный участок из универсальных станков. В пределах данного участка заготовка проходит последовательно

через q операций. Оборудование данного участка, с точки зрения организации изготовления партии деталей, характеризуется следующими особенностями:

- 1) Детали изготавливаются партиями; обработке партии заготовок на каждом из i станков, $i=1, \dots, q$ предшествует наладка.
- 2) Универсальные станки настраиваются на изготовление одной детали, реже – группы деталей; при этом МТП изготовления разных деталей могут различаться.
- 3) Во время наладки любого из станков на другую деталь или группу деталей все остальные станки на участке работают, поскольку время наладки сопоставимо со временем изготовления партии деталей на любой из операций.
- 4) Наладку каждого из станков осуществляет «собственный» оператор, поэтому наладки друг от друга независимы.

Время изготовления партии деталей на предметно-специализированном участке из универсальных станков состоит из:

- суммы времен первичных отладок по операциям;
- суммы времен изготовления партии на каждой из q операций;
- суммы времен межоперационного пролеживания.

Сумма времен изготовления партии на q последовательных операциях ($\sum \Theta_{1(\text{унив})}$):

$$\sum \Theta_{1(\text{унив})} = \frac{1}{\eta_{\text{ис(унив)}}} \cdot N \sum_{i=1}^q t_{\text{оп}i}, \quad (5)$$

где $t_{\text{оп}i}$ – оперативное время изготовления детали на i -ой операции;

N – размер партии деталей;

$\eta_{\text{ис(унив)}}$ – коэффициент использования времени межналадочных периодов универсального станка.

В первом приближении общий объем необходимых технологических воздействий распределен по q операциям равномерно, то есть, все $t_{\text{оп}i} = \frac{t_{\text{оп}}}{q}$, где $t_{\text{оп}}$ – необходимое оперативное время изготовления детали.

Суммарное время необходимых технологических воздействий на универсальных станках и станках с ЧПУ не равны. Для сопоставления времен циклов изготовления партий деталей необходим пересчет оперативных времен с использованием коэффициентов прогрессивности ($K_{\text{пр}}$):

$$\sum_{i=1}^q t_{\text{оп}i} = T_{(\text{ЧПУ})} \cdot K_{\text{пр}}. \quad (6)$$

Отсюда:

$$\sum \Theta_{1(\text{унив})} = \frac{1}{\eta_{\text{ис(унив)}}} \cdot N \cdot T_{(\text{ЧПУ})} \cdot K_{\text{пр}}. \quad (7)$$

Времена первичных отладок универсальных станков не зависят от оперативного времени, поскольку в данном случае нет необходимости полностью изготавливать и контролировать пробные детали. Данное время называется подготовительно-заключительным

($T_{п.з.}$). Суммарное время первичных отладок при прохождении партии деталей по МТП составит:

$$\sum \Theta_{2(унив)} = \sum_{i=1}^q T_{п.з.i}. \quad (8)$$

Предположив равномерность дифференциации необходимого технологического воздействия по операциям, получим:

$$\sum \Theta_{2(унив)} = T_{п.з.} \cdot q. \quad (9)$$

Время межоперационного пролеживания ($T_{ожi}$) для участков из универсальных станков чаще всего пропорционально времени изготовления партии деталей. Тогда:

$$T_{ожi} = K_{ож} \cdot N \cdot t_{опi}, \quad (10)$$

где $K_{ож}$ - коэффициент пропорциональности.

Выражая $t_{опi}$ через $T_{(чпу)}$ и суммируя по числу операций, получим:

$$\sum T_{ож} = K_{ож} \cdot N \cdot T_{(чпу)} \cdot K_{пр} \cdot q. \quad (11)$$

Таким образом, полное время цикла изготовления партии деталей на универсальном станке составит:

$$\sum \Theta_{(унив)} = \sum \Theta_{1(унив)} + \sum \Theta_{2(унив)} + \sum T_{ож}. \quad (12)$$

Подставляя выражения для составляющих и упрощая, получим:

$$\sum \Theta_{(унив)} = \frac{N \cdot T_{(чпу)} \cdot K_{пр}}{\eta_{ис(унив)}} \cdot (1 + K_{ож} \cdot q \cdot \eta_{ис(унив)}) + T_{п.з.} \cdot q. \quad (13)$$

Объект сравнения – АЛ или ПАЛ включает q последовательных позиций, на каждой из которых возможно разное число позиций параллельных p_i , $i = 1 \dots q$. Это оборудование, с точки зрения организации изготовления партии деталей, характеризуется следующими особенностями:

- 1) Заготовки с позиции на позицию линии передаются поштучно.
- 2) Линия налаживается на изготовление одной детали (АЛ) или группы деталей (ПАЛ)
- 3) Во время наладки на другую деталь (АЛ) или другую группу деталей (ПАЛ) вся линия не работает, поскольку время наладки много больше времени прохождения одной детали на любой из позиций.
- 4) Наладку осуществляет бригада наладчиков, последовательно от позиции к позиции. При этом на одной и той же последовательной позиции наладку параллельных позиций тоже осуществляют последовательно.

Величина q определяется первичной и вторичной дифференциацией. Основные времена на каждой позиции линии t_{oi} (они могут быть разными) равны или кратны такту выпуска (t_d). Для проектируемой новой линии:

$$p_i = \frac{t_{oi}}{t_d \cdot \eta_{ис(АЛ)}}, \quad (14)$$

где $\eta_{ис(АЛ)}$ – коэффициент использования времени межналадочных периодов АЛ [3];

p_i - число параллельных позиций;

t_d - такт выпуска деталей.

Времена наладок при проектировании АЛ и ПАЛ не учитывают.

Если необходимый объем обработки распределен между последовательными позициями равномерно, все t_{oi} одинаковы и равны $\frac{t_o}{q}$, значения p_i тоже получаются равными.

При проведении сравнительного расчета использовано это предположение. Считая технический уровень современных станков с ЧПУ и современных ПАЛ равным, принято, что суммарное время необходимых технологических воздействий (времена циклов) для этих типов оборудования равно: $T_{(чпу)} = \sum_{i=1}^q T_{i(АЛ)}$.

Время изготовления новых деталей на ПАЛ будет состоять из:

- а) времени отладки;
- б) времени прохождения первой детали во всем позициям;
- в) суммарного времени нахождения на лимитирующей позиции остальных деталей партии (если партия состоит из N деталей, считается время нахождения на лимитирующей позиции $N-1$ деталей).

Время первичной отладки АЛ или ПАЛ состоит из времен отладки каждой позиции и времен отладки межпозиционной передачи. В отношении времен отладки каждой из позиций принята гипотеза о пропорциональности времени отладки и времени цикла через коэффициент K_2 . Тогда доля времени отладок АЛ, затрачиваемая на отладки каждой из q позиций, может быть вычислена, как:

$$\sum \Theta_{21(АЛ)} = K_{2(АЛ)} \sum_{i=1}^q T_{i(АЛ)} \cdot p_i. \quad (15)$$

Если все t_{oi} , а, следовательно, и все p_i равны и с учетом принятого предположения о равенстве необходимых времен технологических воздействий на АЛ и станке с ЧПУ, формула (15) упрощается:

$$\sum \Theta_{21(АЛ)} = K_{2(АЛ)} \cdot T_{(чпу)} \cdot p. \quad (16)$$

Значение данной величины не зависит от q , поскольку, в рамках выдвинутой гипотезы каждое из $T_{i(АЛ)}$ будет равно $T_{(чпу)}/q$, и при суммировании по q в результате получится $T_{(чпу)}$.

Доля времени наладок, затрачиваемая на наладку механизмов передачи между позициями, не зависит от времени нахождения детали на позиции. Суммарное время, затрачиваемое на эти наладки, будет пропорционально числу позиций q :

$$\sum \Theta_{22(АЛ)} = t_{м.н.} \cdot q, \quad (17)$$

где $t_{м.н.}$ - время единичной межпозиционной наладки.

Общее время наладки АЛ на изготовление новой детали или группы деталей:

$$\sum \Theta_{2(АЛ)} = K_{2(АЛ)} \cdot T_{(чпу)} \cdot p + t_{м.н.} \cdot q. \quad (18)$$

Время прохождения первой детали по всем q позициям линии равно сумме времен нахождения одной детали на каждой из позиций с учетом надежности линии:

$$\Theta_{11(АЛ)} = \frac{1}{\eta_{ис}} \cdot K_1 \cdot \sum_{i=1}^q t_{oi}. \quad (19)$$

При равномерной дифференциации общего необходимого основного времени изготовления деталей t_o на q позиций все $t_{oi} = \frac{t_o}{q}$, тогда:

$$\Theta_{11(АЛ)} = \frac{1}{\eta_{ис(АЛ)}} \cdot \frac{T_{(ЧПУ)}}{q} \cdot q = \frac{T_{(ЧПУ)}}{\eta_{ис(АЛ)}}. \quad (20)$$

Из (20) видно, что время изготовления первой детали при выдвинутых приближениях не зависит от числа последовательных позиций q . Это время не зависит и от числа параллельных позиций p , поскольку первая деталь проходит только через одну из параллельных позиций.

Время прохождения $(N-1)$ деталей через лимитирующую позицию:

$$\Theta_{12(АЛ)} = \frac{(N-1)}{\eta_{ис(АЛ)}} \cdot K_1 \cdot \left(\frac{t_{oi}}{p_i}\right)^{max}, \quad (21)$$

где $\left(\frac{t_{oi}}{p_i}\right)^{max}$ - время нахождения деталей на лимитирующей позиции.

Если все t_{oi} равны $\frac{t_o}{q}$, и, все p_i тоже равны, то:

$$\Theta_{12(АЛ)} = \frac{(N-1)}{\eta_{ис(АЛ)}} \cdot \frac{T_{(ЧПУ)}}{p \cdot q}. \quad (22)$$

Очевидно, что время нахождения деталей на лимитирующей позиции зависит и от p и от q .

Суммируя затраты времени на изготовление партии деталей по всем трем составляющим, получим:

$$\sum \theta_{(АЛ)} = K_{2(АЛ)} \cdot T_{(ЧПУ)} \cdot p + t_{м.н.} \cdot q + \frac{T_{(ЧПУ)}}{\eta_{ис(АЛ)}} + \frac{(N-1)}{\eta_{ис(АЛ)}} \cdot \frac{T_{(ЧПУ)}}{p \cdot q}. \quad (23)$$

Упрощая, получим:

$$\sum \theta_{(АЛ)} = \frac{T_{(ЧПУ)}}{\eta_{ис(АЛ)}} \left(K_{2(АЛ)} \cdot p \cdot \eta_{ис(АЛ)} + 1 + \frac{(N-1)}{p \cdot q} \right) + t_{м.н.} \cdot q. \quad (24)$$

Пример расчета и выбора варианта с использованием предложенной методики

Выполнен сравнительный расчет времен цикла изготовления партий деталей на станках с ЧПУ, АЛ, универсальных станках. Целью расчета было установление критических значений размеров партий, разграничивающих области рационального применения каждого из типов оборудования.

Рассмотрены вариант изготовления партий деталей:

- на станке с ЧПУ;
- на АЛ из 5 последовательных позиций с дифференциацией времени обработки по позициям;
- на последовательности универсальных станков из 5 операций, с равномерной дифференциацией времени изготовления по операциям.

Варьируемые в расчете параметры:

- Основное время обработки на станке с ЧПУ $t_{o(чпу)}$, принятое за базу для расчетов. Данная величина принимает значения: $t_{o(чпу)}=0,1$ час; $t_{o(чпу)}=1$ час; $t_{o(чпу)}=10$ час.
- Размер обрабатываемой партии N . Данная величина принимает значения: 1; 25; 50; 75; 100; 125; 150 шт.

Используемые в расчете значения эмпирических коэффициентов и других величин получены из [4], [5] (табл. 1).

Таблица 1. Значения величин, используемых в расчетах

№	Наименование величины, размерность	Обозначение	Значение для		
			Станки с ЧПУ	АЛ	Универсальные станки
1	Коэффициент использования времени межналадочных периодов оборудования	$\eta_{ис}$	0,8	0,6	0,85
2	Коэффициент пропорциональности между основным временем и временем цикла изготовления детали на станке	K_1	1,4	1,2	3
3	Коэффициент пропорциональности между временем цикла изготовления детали на станке и временем первичной отладки	K_2	14	40	нет
4	Коэффициент прогрессивности оборудования	$K_{пр}$	1	1,2	1
5	Коэффициент пропорциональности между временем цикла изготовления партии деталей на станке и временем межоперационного пролеживания	$K_{ож}$	нет	нет	0,1
6	Подготовительно-заключительное время, час	$T_{п.з.}$	нет	нет	0,3
7	Время единичной межпозиционной наладки АЛ	$t_{м.н.}$	нет	10	нет

Для каждого из сочетаний исходных данных вычислялись отношения времен циклов изготовления партий деталей на универсальном оборудовании и АЛ к времени цикла изготовления партии деталей на станке с ЧПУ (рисунки 1, 2).

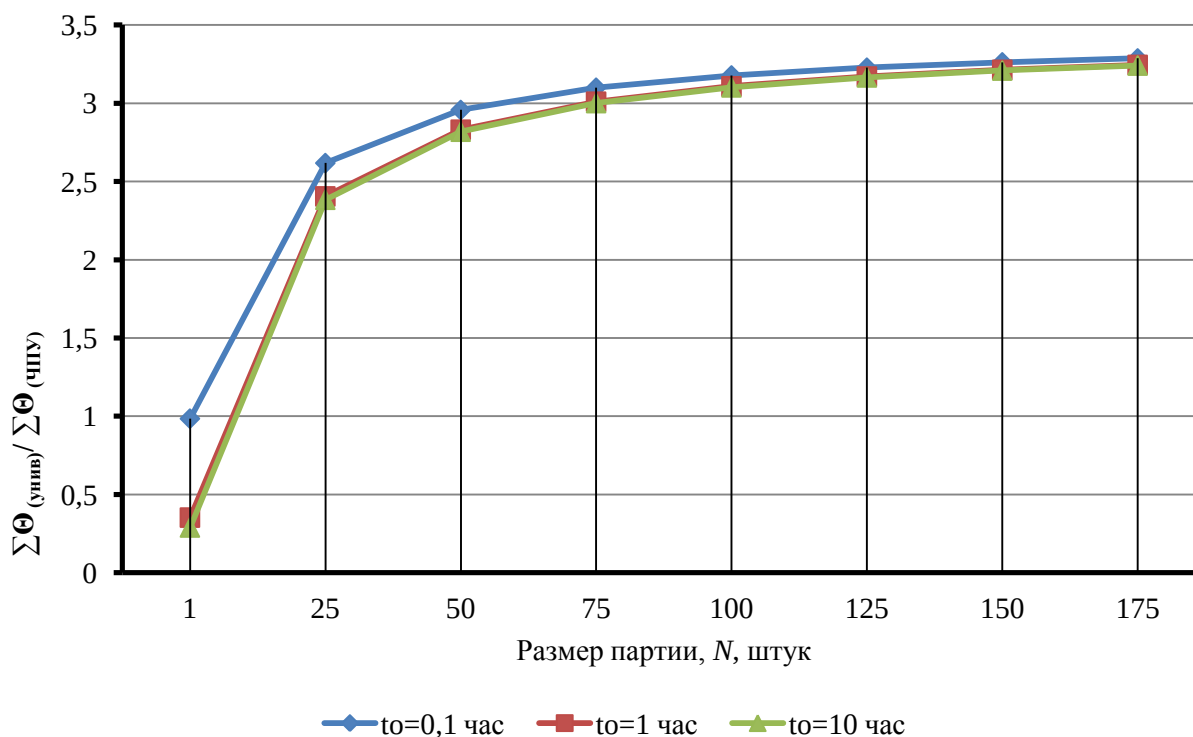


Рисунок 1 - Отношение времени изготовления партии деталей на последовательности универсальных станков и на станке с ЧПУ в зависимости от размера партии и основного времени обработки (t_0)

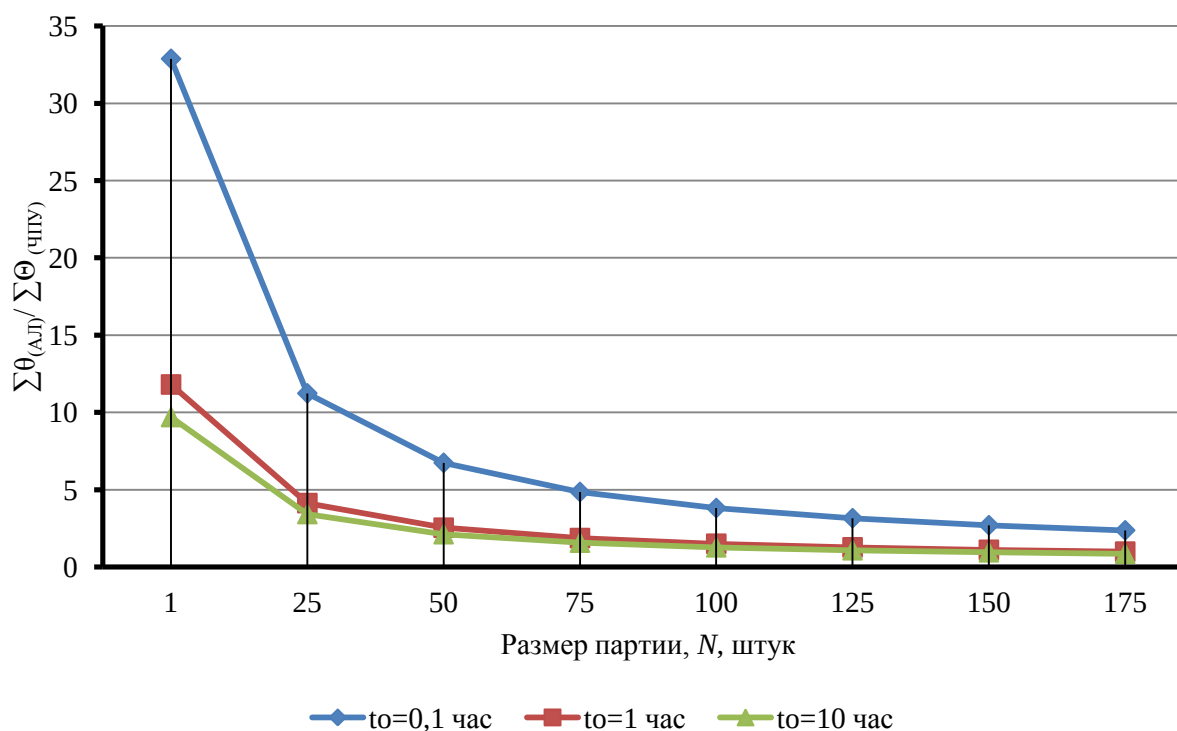


Рисунок 2 - Отношение времени изготовления партии деталей на АЛ и на станке с ЧПУ в зависимости от размера партии и основного времени обработки (t_0)

Выводы

Анализ полученных результатов позволил сделать следующие выводы:

1) Время цикла изготовления партии деталей на станках с ЧПУ становится меньшим, чем время обработки той же партии на последовательности универсальных станков при размерах партии, не превышающих 25 деталей. Это означает, что, с точки зрения производительности обработки, применение станков с ЧПУ оправданно в условиях многономенклатурного, часто переналаживаемого производства, даже с учетом значительного времени, затрачиваемого на отладку процесса изготовления.

2) С учетом различия в стоимости минуты эксплуатации (коэффициента машино-часа) универсальных станков и станка с ЧПУ, область рационального применения последних начинается примерно с программы в 100 деталей.

Время цикла изготовления партии на АЛ становится меньшим, чем время цикла изготовления той же партии на станке с ЧПУ при программах, превышающих 200 деталей. Однако, это справедливо лишь в том случае, если наладка АЛ на новую деталь или группу деталей проводится без изменения структуры линии и ее конструкции. В противном случае время, необходимое для отладки, будет значительно бóльшим. Конкурировать со станками с ЧПУ в условиях переналаживаемого производства могут только переналаживаемые автоматические линии.

3) С учетом различия в стоимости станка с ЧПУ и ПАЛ, на сегодняшний день достигающей десятков раз, область рационального применения ПАЛ начинается с программ выпуска в несколько тысяч деталей.

Кроме времени цикла изготовления партии деталей для каждого из типов оборудования при каждом из сочетаний исходных данных вычислялись коэффициенты экстенсивного использования оборудования ($K_{\text{эи}}$), как отношение суммы оперативных времен к времени цикла изготовления партии. Результаты расчетов приведены на рис. 3-5.

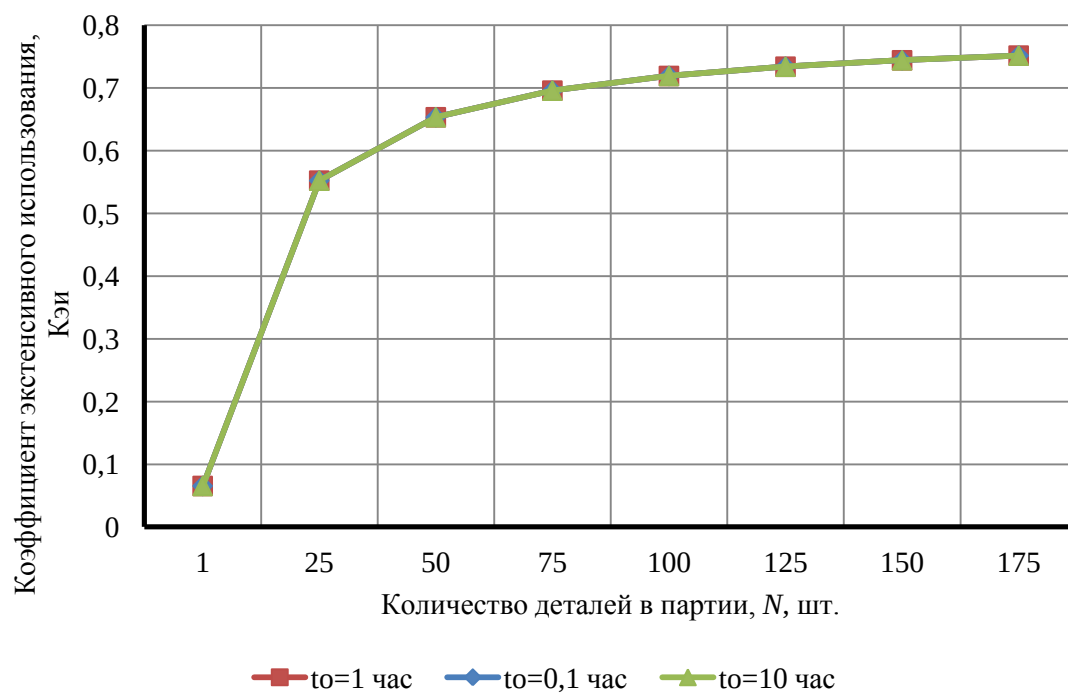


Рисунок 3 - Зависимость коэффициента экстенсивного использования станков с ЧПУ от количества деталей в партии и основного времени изготовления детали (t_o)

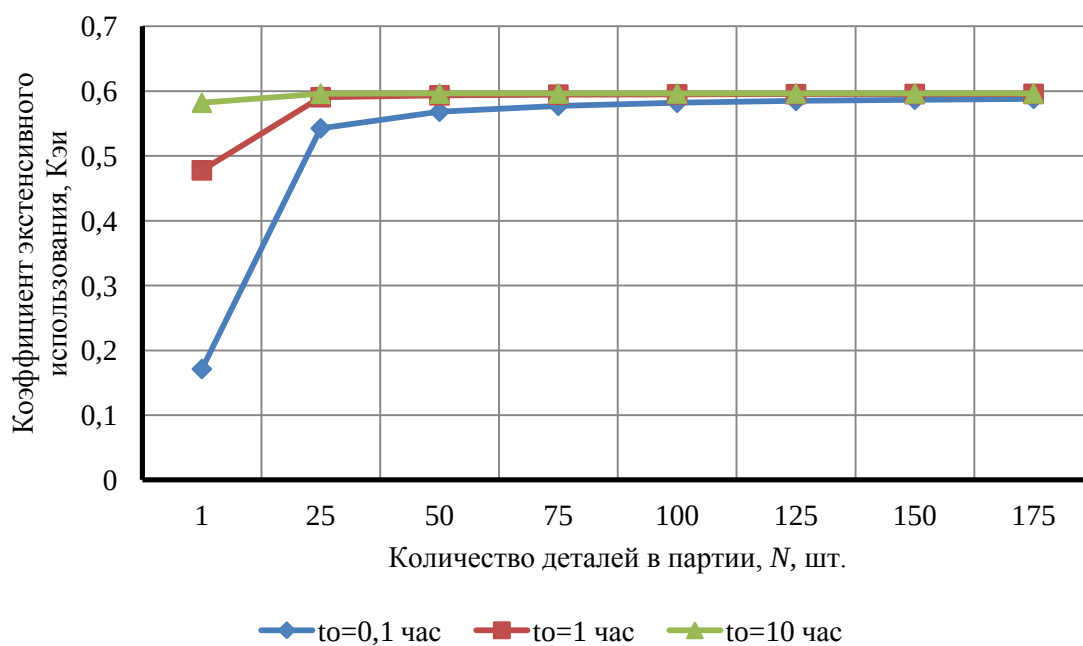


Рисунок 4 - Зависимость коэффициента экстенсивного использования универсальных станков от количества деталей в партии и основного времени изготовления детали (t_o)

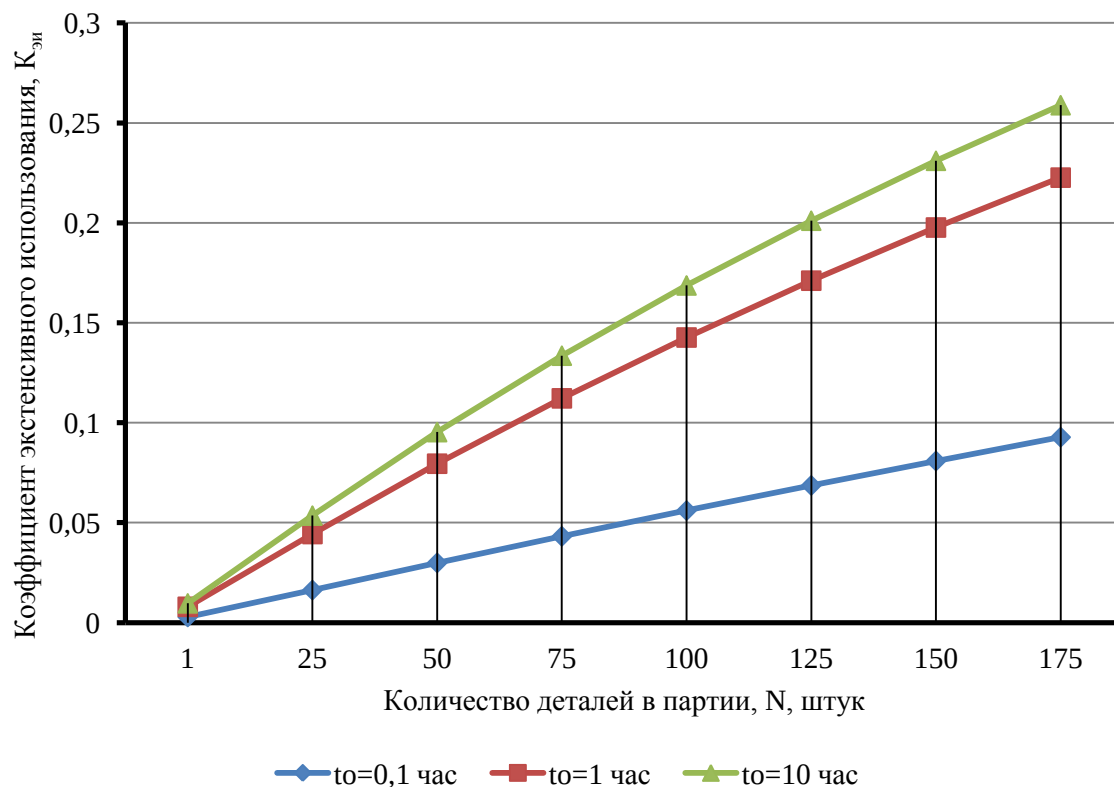


Рисунок 5 - Зависимость коэффициента экстенсивного использования АЛ от количества деталей в партии и основного времени изготовления детали (t_o)

Выполненный расчет позволил оценить ожидаемое использование рассматриваемого оборудования в составе ТК. Полученные численные значения могут быть использованы для:

- 1 Выявления области рационального использования каждого из типов оборудования;
- 2 Анализа степени использования каждого из типов оборудования во времени при изготовлении деталей партиями.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

- 1 В рамках принятой математической модели определения составляющих затрат времени при работе на станках с ЧПУ значения коэффициента экстенсивного использования оборудования не зависят от величины основного времени обработки. Для универсальных станков и АЛ подобная зависимость существует.
- 2 Коэффициент экстенсивного использования станка с ЧПУ приближается к значению $K_{эи(ЧПУ)} = 0,8$ уже при размерах партий $N = 200$ штук.
- 3 Мера использования во времени универсальных станков при увеличении размера партии стремится к предельному значению (см. рисунок 4), определяемому затратами подготовительно-заключительного времени и, в особенности, межоперационным пролеживанием. Эти виды затрат времени в условиях реального производства полностью устранить невозможно.

- 4 Коэффициенты экстенсивного использования АЛ в рассмотренных пределах размеров партий не превышают значений $K_{\text{эл(АЛ)}}=0,3$. Для того чтобы мера использования АЛ во времени превысила величину $K_{\text{эл(АЛ)}}=0,8$ необходимы (по расчетам) размеры партий деталей, превышающие 2000 штук.

Список литературы.

1. Брахман Т.Д. Многокритериальность и выбор альтернатив в технике. М.: Радио и связь, 1984. 288 с.
2. Волчкевич И.Л. Расчет необходимого количества оборудования при проектировании технологических комплексов в условиях многономенклатурного производства // Электронное научно-техническое издание Наука и образование. 2012. № 3. URL. <http://technomag.edu.ru/doc/362271.html>.
3. Волчкевич Л.И. Надежность автоматических линий. М.: Машиностроение, 1969. 309 с.
4. Волчкевич Л.И. Автоматизация производственных процессов: учеб. пособие. М.: Машиностроение, 2009. 380 с.
5. Мельников Г.Н., Вороненко В.П. Проектирование механосборочных цехов: Учебник для вузов / Под ред. А.М.Дальского. М.: Машиностроение, 1990. 352 с.