

В. К. Тютюкин

МИНИМИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ЦИКЛА В РОБОТИЗИРОВАННЫХ МОДУЛЯХ

В публикациях по гибким автоматизированным производствам (ГАП)¹ математическому моделированию уделяется недостаточное внимание. Однако работа по устранению этого недостатка уже начинается². В настоящей статье для одного из видов роботизированных комплексов (РК)³ – роботизированных модулей – дается его характеристика (определение, классификация и примеры), приводится соответствующий вид экстремальной задачи, поставленной⁴ для любого РК, и ее решение.

Характеристика роботизированных технологических модулей

Роботизированный технологический модуль (РТМ) – это такой РК, в котором выполняется только одна технологическая операция, причем это осуществляется на единственном станке, если она является станочной (т. е. происходит на станке), и одним или несколькими (но одновременно) технологическими промышленными роботами (ПР), если операция не станочная.

Технологическое оснащение РТМ, как и любого РК, включает в себя, помимо указанного основного оборудования (станка с ЧПУ или технологических ПР), вспомогательное оборудование – питатель (П), накопитель (Н) и дополнительное устройство (ДУ). Питатель предназначается для размещения в нем заготовок или деталей (полуфабрикатов). Однако он является не просто емкостью, а автоматическим оборудованием, ибо обеспечивает установку детали в позиции, в которой робот осуществляет ее захват. Накопитель предназначается для размещения изготовленных РТМ деталей. Питатель и накопитель работают в автоматическом или полуавтоматическом режиме. Они способны быстро перенастраиваться при смене объектов изготовления. Емкость их должна

Виктор Константинович ТЮТЮКИН – д-р экон. наук, профессор кафедры экономической кибернетики СПбГУ. Окончил математико-механический факультет СПбГУ (1964) и аспирантуру кафедры экономической кибернетики СПбГУ (1972). В Университете работает с 1965 г. Кандидатскую диссертацию защитил в 1973 г., докторскую – в 1989. Стажировался в университетах Франции (1976). Область научных интересов – производственный менеджмент, гибкие автоматизированные производства, микроэкономика. Автор около 40 научных публикаций, в том числе одного учебного пособия с грифом Министерства (в соавторстве) и одной монографии.

© В. К. Тютюкин, 2007

быть достаточно большой, чтобы обеспечить непрерывную работу РТМ без человека в течение нескольких (не менее 10–12) часов. Дополнительное устройство предназначается для временного хранения на нем межоперационного задела и располагается перед станком⁵.

Как видно, РТМ — это простейшие виды РК. Их создание выступает промежуточным этапом роботизации (автоматизации), ибо они являются структурообразующими элементами («кирпичиками») при создании ГАП более сложной структуры. Они имеют наименьшую степень гибкости по сравнению с РК других видов.

Так как в РТМ выполняется всего одна технологическая операция, то название его осуществляется в соответствии с этой операцией, т. е. видом роботизируемого производства, например: роботизированный *штамповочный* модуль, РМ *литья под давлением*, роботизированный *окрасочный* модуль (ниже будут приведены примеры этих трех РТМ), РМ *токарной* обработки.

Приведем классификацию РТМ (рис. 1) и охарактеризуем их виды.

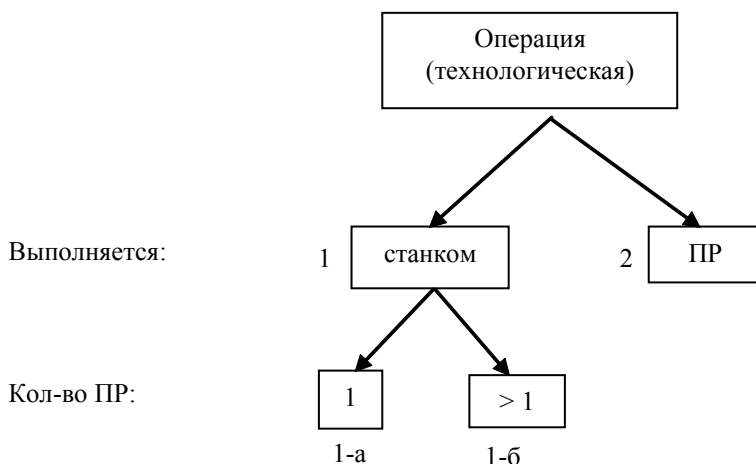


Рис. 1. Классификация РТМ.

Как видно из определения РТМ, в зависимости от специфики выполняемой технологической операции она может выполняться либо станком, либо роботами. В соответствии с этим имеем два вида РТМ (1 и 2). Вид 1, в свою очередь, подразделяется на два подвида в зависимости от сравнения с единицей количества стационарных роботов, выполняющих вспомогательные операции (загрузка-разгрузка станка и вспомогательного оборудования — П, Н, а иногда и ДУ, если оно есть): если это количество равно единице, то получается первый подвид (вид 1-а), а если больше единицы — второй подвид (вид 1-б).

Охарактеризуем все эти три вида РТМ, дадим их примеры, для каждого из которых покажем графически (рис. 2–7) его технический состав (структуру) и взаимное расположение в пространстве всех его технических компонент.

Вид 1. В этом случае операция является станочной, т. е. выполняется станком-автоматом. Этот станок по условию является единственным, т. е. на операции нет дублирующего оборудования.

Причинами, по которым в РК зачастую не включается более одного станка (и, следовательно, когда получается РТМ вида 1), являются следующие:

- большие габаритные размеры станка;
- необходимость предоставления для манипулятора каждого робота рабочей зоны достаточных размеров;
- необходимость предоставления проходов для других (уже подвижных) роботов.

Вид 1-а. В этом случае единственным является не только станок, но и робот. Тогда говорят, что имеем РТМ типа «робот–единица технологического оборудования». Случай единственного робота в РТМ более распространен на практике.

Пример РТМ вида 1-а – роботизированный *штамповочный* модуль (рис. 2).

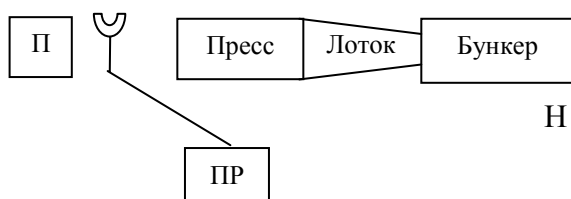


Рис. 2. Роботизированный штамповочный модуль.

Как видно из названия данного РТМ, выполняемой в нем технологической операцией является штамповка. Заготовки – это стальные листы, находящиеся в питателе (П). Из них изготавливаются те или иные части кузова автомашины. Для этого каждый лист надо изогнуть определенным образом, пробить в нем отверстия и т. п. Осуществляются эти операции на единственном станке – прессе. Дополнительного устройства (ДУ) перед ним нет. В данном модуле имеется только один робот, причем с одним манипулятором, осуществляющим только загрузку прессы заготовкой. Разгрузка же прессы осуществляется сдувом готовой детали по лотку в накопителе (Н), которым является специальный бункер.

Вид 1-б. Здесь, согласно классификации, имеем РТМ типа «несколько роботов – единица технологического оборудования» и операции по обслуживанию оборудования (основного – станка и вспомогательного – П, Н, а иногда и ДУ, если оно имеется) разделены между этими роботами.

Причинами, по которым в РТМ целесообразней иметь несколько роботов (а не единственный), являются следующие.

- ♦ *Большие габаритные размеры станка.*

Действительно, в этом случае целесообразно сделать такую установку: с одной стороны станка – первый робот (для загрузки станка), а с другой стороны станка – второй робот (для разгрузки станка).

- ♦ *Необходимость иметь рабочие органы разного вида (у роботов).*

Такая необходимость возникает при значительном изменении агрегатного состояния, формы, размеров и другого параметра предмета труда в ходе технологической операции.

- ♦ *Недостаточное быстроедействие робота (по сравнению с быстроедействием обслуживаемого им станка), т. е. случай, когда именно робот является «узким местом» в РТМ.*

Таким образом, использование нескольких роботов позволяет:

- повысить производительность РТМ, а следовательно, и сократить производственный цикл (за счет параллельной работы этих нескольких роботов);
- упростить конструкцию и систему управления используемых роботов.

Примеры РТМ вида 1-6 (ДУ перед станком нет).

1. Роботизированный *штамповочный* модуль (рис. 3).

Его отличие от рассмотренного в предыдущем примере состоит только в том, что здесь имеются два робота: ПР-1 (загрузчик) и ПР-2 (разгрузчик).

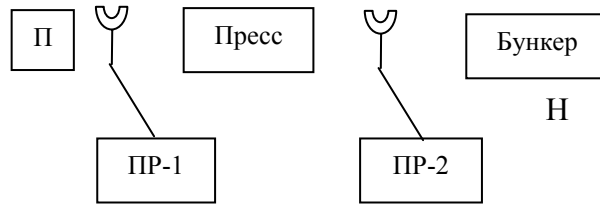


Рис. 3. Роботизированный штамповочный модуль с двумя роботами.

Иногда вместо двух роботов используют один, но с двумя манипуляторами, один из которых (левый) применяется для загрузки, а другой (правый) — для разгрузки пресса (рис. 4).

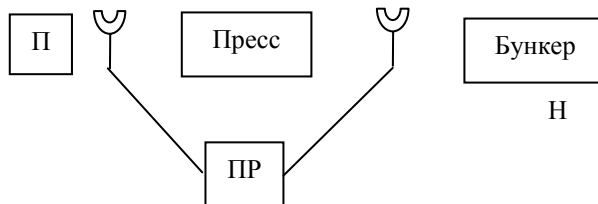


Рис. 4. Роботизированный штамповочный модуль с роботом, имеющим два манипулятора.

2. Роботизированный модуль *литья под давлением* (рис. 5).

Здесь станком является машина литья под давлением. Питатель (П) — это электропечь (раздаточная). ПР-1 (заливщик, дозатор) зачерпывает порцию (дозу) жидкого металла из электропечи (поэтому его рабочий орган имеет вид ковша) и заливает ее в пресс-форму (камеру для прессования). ПР-2 (съемщик отливок) осуществляет разгрузку пресс-формы (вынимание отливки) и переносит отливку в ванну для охлаждения, которая служит накопителем (Н). Так как агрегатное состояние отливки является твердым, то рабочим органом ПР-2 должно быть захватное устройство.

Вид 2. В этом случае операция является нестаночной и, следовательно, выполняется одним или несколькими роботами. Доставка и унос деталей осуществляются другими роботами (транспортными) или с помощью конвейера.

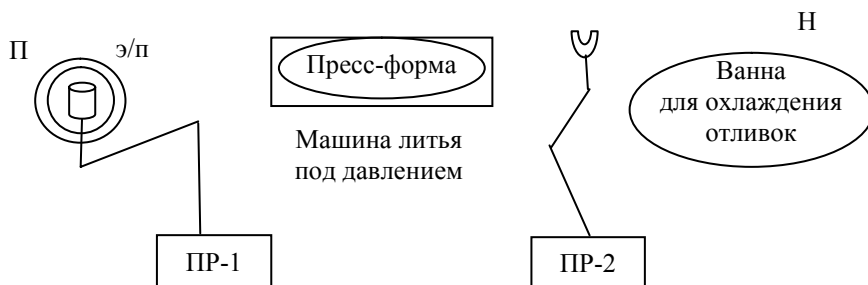


Рис. 5. Роботизированный модуль литья под давлением.

Пример РТМ вида 2 – роботизированный окрасочный модуль (рис. 6).

Как видно из названия данного РТМ, выполняемой в нем технологической операцией является окраска. Пусть деталями, поступающими на окраску, выступают элементы металлических шкафов. Так как такие детали имеют плоскую форму, то их окраску (в специальной камере) можно осуществлять одновременно с двух сторон, для чего в модуле и имеются два окрасочных робота (ПР-1 и ПР-2). Транспортировка деталей (доставка на окраску и унос окрашенных деталей) пусть осуществляется с помощью подвесного конвейера. Окрашенные элементы шкафов далее поступают на сборку. Трудоемкости окрасочных работ и известный ритм сборки определяют скорость движения подвесного конвейера (например, 1,5 м/мин) и плотность подвески деталей на нем (например, 3 м).

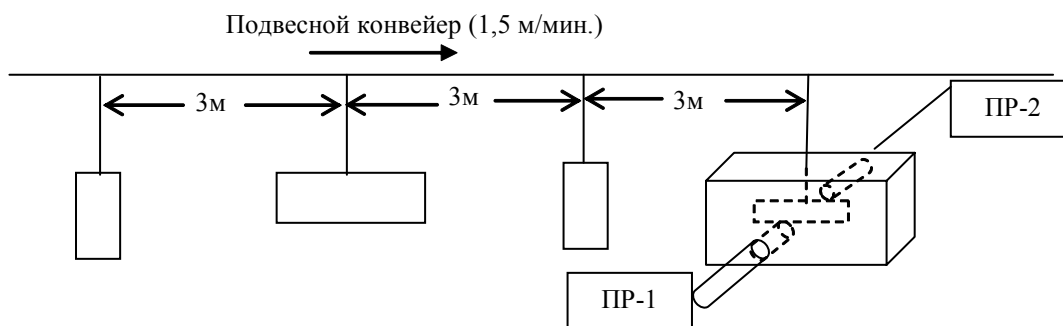


Рис. 6. Роботизированный окрасочный модуль.

Выбор емкости дополнительного устройства для РТМ типа «робот–единица технологического оборудования»

Технический состав РТМ рассматриваемого вида приведен на рис. 7.

В нем технологическая операция является станочной и для ее выполнения имеется единственный станок (С). Обслуживающие операции производятся единственным роботом (ПР), который является стационарным. Помимо этого основного оборудования в РТМ имеется также и вспомогательное оборудование: питатель (П), накопитель (Н), а если целесообразно, то и дополнительное устройство (ДУ) перед станком – по одной

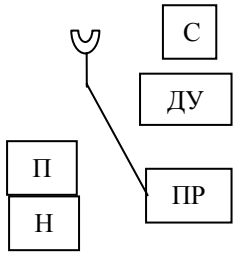


Рис. 7. Технический состав РТМ вида 1-а.

штуке каждого вида. П и Н находятся в непосредственной близости друг от друга, но на некотором расстоянии от станка (С). ДУ располагается, как обычно, в непосредственной близости от С.

Исходные данные (6 величин) задаются для одной штуки деталей, и ими являются следующие величины: z — время загрузки (деталью) станка, r — время разгрузки станка (снятия с него готовой детали), m — машинное время выполнения операции (обозначим сумму этих трех величин: $z + m + r = a$ — штучное время изготовления детали на станке), \bar{r} — время разгрузки питателя, \bar{z} — время загрузки накопителя, p — время поворота манипулятора робота от питателя к станку

или дополнительному устройству (П → С или ДУ), а также от станка или дополнительного устройства к накопителю (С или ДУ → Н).

Считаем нулевым время обслуживания (загрузки или разгрузки) ДУ (т. е. обслуживание ДУ — мгновенное, на графике — это точка, а не отрезок) и поворота манипулятора С ↔ ДУ и Н → П (ибо они — рядом друг с другом).

Для рассматриваемого РТМ экстремальная задача (модификация общей, т. е. для любого РК, постановки задачи) принимает следующий вид. Спрашивается, целесообразно ли иметь ДУ (перед станком) и в случае положительного ответа — какой емкости: на одну штуку или на две штуки. Другими словами, требуется найти емкость ДУ (она является аргументом в задаче), при которой цикл минимален ($\pi \rightarrow \min$). Решим эту задачу.

Прежде всего заметим, что величину цикла можно представить в виде суммы двух (а не трех, как в общем случае) слагаемых: $\pi = V + P$, где V — время обслуживания роботом всего оборудования в РТМ, P — время простоя робота, т. е. бездействия его манипулятора, ($P \geq 0$) в любом цикле. Третье слагаемое (D — время движения ПР) в формуле отсутствует, ибо ПР является неподвижным ($D = 0$). Ясно, что величины V и P , как и π , зависят от емкости ДУ.

Отсутствие или наличие простоев робота (т. е. $P = 0$ и $P > 0$ — обозначим эти два случая, соответственно, через a и b) зависит от соотношения исходных данных, а именно от величины m — маленькая она или большая по сравнению с другими исходными данными. В случае a (т. е. $P = 0$) робот загружен непрерывно (выполняет все обслуживающие операции подряд друг за другом), является узким местом, определяет цикл $\pi = V + P = V$, но зато у станка есть простой. В случае b (т. е. $P > 0$) непрерывности выполнения роботом всех четырех обслуживающих операций для станка уже нет.

Решение задачи вытекает из следующего результата.

Утверждение. При емкости ДУ на две штуки цикл меньше, чем при его емкости на одну или ноль штук.

Таким образом, целесообразно наличие ДУ и при том максимально допустимой емкости. Наличие ДУ и его использование означает допущение задела, что и способствует уменьшению цикла.

Доказательство. Предварительно заметим, что конкретная емкость ДУ влечет конкретный же оптимальный (однозначный и достаточно очевидный) порядок обслуживающих операций, а следовательно, и соответствующую величину цикла (формула

расчета величины π). Поэтому для каждой допустимой емкости ДУ (2, 1, 0 – три случая) построим соответствующую оптимальную циклограмму (календарный график, расписание), по ним (т. е. графическим методом) найдем для каждой из них формулы расчета цикла π . Сравнение полученных трех формул и докажет утверждение.

Для построения указанных циклограмм (КГ) заметим следующее.

1. Так как в РТМ имеется всего один станок (и, следовательно, робот – стационарный) и работа организуется как ритмичная (циклическая, периодически повторяющаяся), то безразлично, что в цикле имеет место для станка: загрузка предшествует разгрузке ($З \prec Р$) или наоборот – разгрузка загрузке ($Р \prec З$).

Действительно, от одной из этих двух циклограмм можно перейти к другой из них за счет изменения начала отсчета, т. е. обе циклограммы равносильны. Выберем, например, первую возможность $З \prec Р$.

2. В силу цикличности работы можно считать, что в начале цикла манипулятор робота находится около любой единицы оборудования – С, П, Н, ДУ. Выберем то его положение, которое нам удобно.

3. Покажем графически, что при наличии ДУ (т. е. при его емкости, не равной нулю, а, следовательно, равной двум или единице – случаи 1 и 2) имеется возможность обслужить параллельно с машинным временем (m):

- ♦ обе единицы вспомогательного оборудования (П и Н) – при емкости ДУ на две штуки;

- ♦ только одну из них – при единичной емкости ДУ.

Использование этой возможности является необходимым условием минимальности цикла при указанных емкостях ДУ, ибо последовательное с машинным временем обслуживание П и Н очевидно хуже параллельного с машинным временем обслуживания хотя бы одной из этих двух единиц вспомогательного оборудования.

Случай 1: емкость ДУ равна 2.

Считаем, что в начале цикла (π) на ДУ имеется заготовка и готовая деталь (помещенные на него в предыдущем цикле). Легко видеть, что целесообразно Н обслужить раньше, чем П, ибо в противном случае требуется больше поворотов манипулятора робота (4, а не 2), что увеличивает цикл.

Оптимальный порядок обслуживающих операций показан на рис. 8.

Подслучай а: $П = 0$ (рис. 8, а).

Как видно из рисунка, условие $П = 0$ равносильно выполнению неравенства $m \leq \bar{r} + \bar{z} + 2p$.

Для величины цикла имеем следующую формулу:

$$\pi = V + П = V = \bar{r} + \bar{z} + 2p + r + z. \quad (1.1)$$

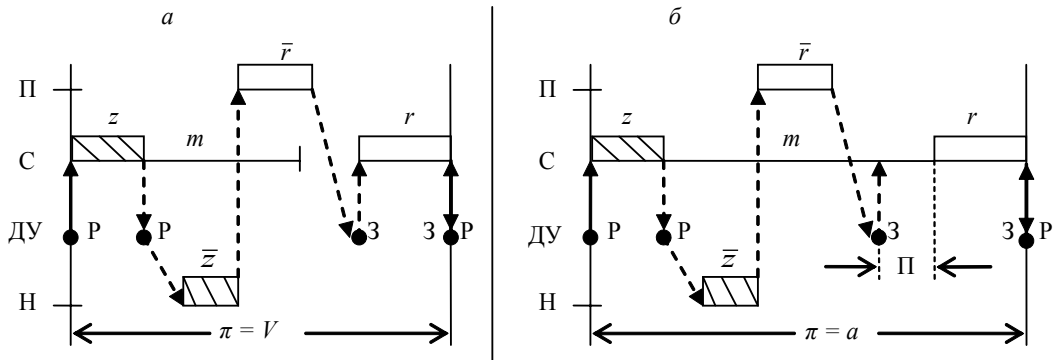
Подслучай б: $П > 0$ (рис. 8, б).

Условие $П > 0$ равносильно выполнению неравенства $m > \bar{r} + \bar{z} + 2p$. Для величины цикла имеем следующую формулу:

$$\pi = a = z + m + r. \quad (1.2)$$

Объединим подслучаи а и б, т. е. запишем формулы (1.1) и (1.2) единой формулой. Так как $\pi \geq V$ и a , то для минимального значения π , удовлетворяющего этим двум неравенствам, имеем $\pi = \max(V, a)$, т. е.

$$\pi = r + z + \max(\bar{r} + \bar{z} + 2p, m). \quad (1)$$



Обозначения: наклонный пунктир — время поворота манипулятора, точки Р и З — моменты разгрузки и загрузки ДУ.

Рис. 8. Оптимальный порядок обслуживающих операций в РТМ при емкости ДУ на две штуки при отсутствии (а) и наличии (б) простоев работа.

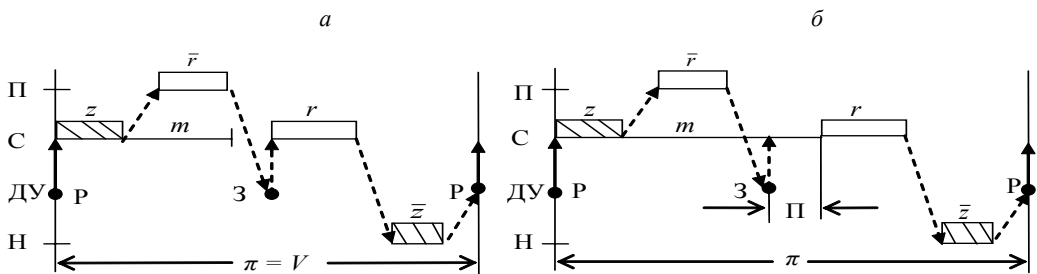
Случай 2: емкость ДУ равна 1.

В этом случае параллельно с машинным временем (m) можно обслужить только одну из двух единиц вспомогательного оборудования — или П (подслучай А) или Н (подслучай Б).

Рассмотрим подслучай А.

В нем загрузка станка заготовкой осуществляется (как и в случае 1, т. е. при емкости ДУ на две штуки) с ДУ (помещенной на него в предыдущем цикле) и, следовательно, ДУ используется только для заготовки.

Оптимальный порядок обслуживающих операций показан на рис. 9.



Обозначения: наклонный пунктир — время поворота манипулятора, точки Р и З — моменты разгрузки и загрузки ДУ.

Рис. 9. Оптимальный порядок обслуживающих операций в РТМ при емкости ДУ на одну штуку, обслуживании параллельно с машинным временем питателя, при отсутствии (а) и наличии (б) простоев работа.

Подслучай а: $\Pi = 0$ (рис. 9, а).

Как видно из рисунка, условие $\Pi = 0$ равносильно выполнению неравенства $m \leq \bar{r} + 2p$. Для величины цикла имеем следующую формулу:

$$\pi = V + \Pi = V = z + r + \bar{r} + \bar{z} + 4p. \quad (2.1.1)$$

Подслучай б: $\Pi > 0$ (рис. 9, б).

Условие $\Pi > 0$ равносильно выполнению неравенства $m > \bar{r} + 2p$. Для величины цикла имеем следующую формулу:

$$\pi = z + m + r + \bar{z} + 2p. \quad (2.1.2)$$

Объединим подслучаи а и б, т. е. запишем формулы (2.1.1) и (2.1.2) единой формулой

$$\pi = z + r + \bar{z} + 2p + \max(\bar{r} + 2p, m). \quad (2.1)$$

Очевидно, цикл по формуле (2.1) больше цикла по формуле (1), ибо каждая из двух величин под знаком \max в (2.1) больше соответствующей величины под знаком \max в (1).

Рассмотрим подслучай Б.

В нем загрузка станка (заготовкой) осуществляется непосредственно из Π и, следовательно, ДУ используется только для готовой детали.

Оптимальный порядок обслуживающих операций показан на рис. 10.

Подслучай а: $\Pi = 0$ (рис. 10, а).

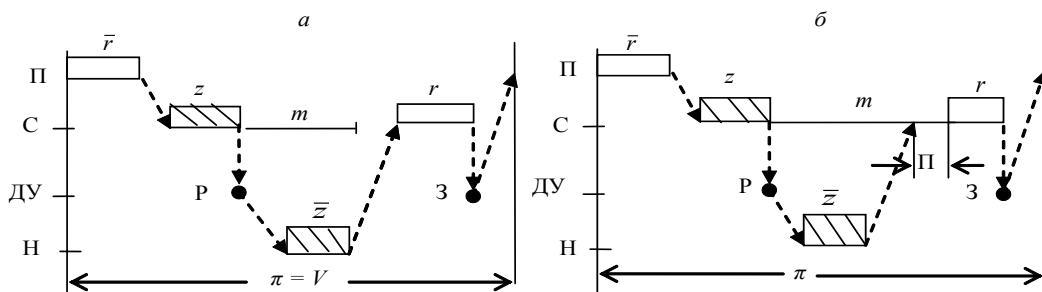
Как видно из рисунка, условие $\Pi = 0$ равносильно выполнению неравенства $m \leq \bar{z} + 2p$. Для величины цикла имеем следующую формулу:

$$\pi = V + \Pi = V = z + r + \bar{r} + \bar{z} + 4p. \quad (2.2.1)$$

Подслучай б: $\Pi > 0$ (рис. 10, б).

Условие $\Pi > 0$ равносильно выполнению неравенства $m > \bar{z} + 2p$. Для величины цикла имеем следующую формулу:

$$\pi = z + m + r + \bar{r} + 2p. \quad (2.2.2)$$



Обозначения: наклонный пунктир – время поворота манипулятора, точки Р и З – моменты разгрузки и загрузки ДУ.

Рис. 10. Оптимальный порядок обслуживающих операций в РТМ при емкости ДУ на одну штуку, обслуживании параллельно с машинным временем накопителя, при отсутствии (а) и наличии (б) простоев робота.

Объединим подслучаи *a* и *b*, т. е. запишем формулы (2.2.1) и (2.2.2) единой формулой:

$$\pi = z + r + \bar{r} + 2p + \max(\bar{z} + 2p, m). \quad (2.2)$$

Очевидно, цикл по формуле (2.2) больше цикла по формуле (1), ибо каждая из двух величин под знаком \max в (2.2) больше соответствующей величины под знаком \max в (1).

Используя формулы (2.1) и (2.2), можно получить следующую величину минимального цикла для случая 2 в целом:

$$\pi = \max \left\{ \begin{array}{l} z + r + \bar{z} + \bar{r} + 4p \\ z + r + m + 2p + \min(\bar{z}, \bar{r}) \end{array} \right. = z + r + 2p + \max \left\{ \begin{array}{l} \bar{z} + \bar{r} + 2p \\ \min(\bar{z}, \bar{r}) + m \end{array} \right. = z + r + 2p + \min(\bar{z}, \bar{r}) + \max(\bar{z} + 2p, \bar{r} + 2p, m). \quad (2)$$

Как показано выше (после вывода формул (2.1) и (2.2)), цикл по формуле (2) больше цикла по формуле (1).

Случай 3: емкость ДУ равна 0 (т. е. ДУ нет).

Покажем, что в этом случае на протяжении машинного времени (*m*) невозможно обслужить ни П, ни Н (т. е. они обслуживаются вне *m*).

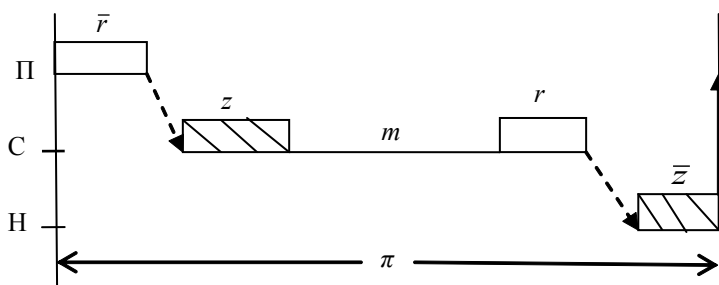


Рис. 11. Порядок обслуживающих операций в РТМ при отсутствии ДУ.

Порядок обслуживающих операций показан на рис. 11.

Для величины цикла имеем следующую формулу:

$$\pi = z + m + r + \bar{r} + \bar{z} + 2p. \quad (3)$$

Очевидно, цикл по формуле (3) больше цикла по формуле (1).

Итак, утверждение доказано — ДУ лучше иметь, причем максимально возможной емкости, равной 2. Оптимальная (минимальная) величина цикла при этом рассчитывается по формуле (1).

Замечание. Формула (1) показывает следующее желательное организационное условие создания РТМ вида «робот–единица технологического оборудования»: $m \approx \bar{r} + \bar{z} + 2p$, т. е. близость машинного времени к времени обслуживания П и Н с учетом необходимых при этом двух поворотов манипулятора робота (эти две величины стоят в формуле (1) под знаком \max).

¹ См., напр.: Козловский В. А., Козловская Э. А., Макаров В. М. Эффективность переналаживаемых роботизированных производств. Л., 1985.

² *Тютюкин В. К.* 1) Расчет минимальной величины цикла для роботизированной технологической ячейки // Экономическая наука в начале третьего тысячелетия: история и перспективы развития: Материалы конференции. СПб., 2005; 2) Оптимальный календарный график для роботизированной линии // Применение математики в экономике: Сб. ст. Вып. 16 / Под ред. А. В. Воронцовского. СПб., 2006.

³ *Тютюкин В. К.* Оптимальный календарный график для роботизированной линии. С. 157–159.

⁴ Там же. С. 159–161.

⁵ Там же. С. 157–158.

Статья поступила в редакцию 19 апреля 2007 г.