

Халиков М. А.

*доктор экономических наук, профессор,
Российский экономический университет им. Г. В. Плеханова,
профессор кафедры «Математические методы в экономике»,
член Международной Академии науки и практики
организации производства
e-mail: mihail.alfredovich@mail.ru*

Выбор варианта компоновочной структуры транспортно-складской системы гибкого автоматизированного производства

В статье на основе инструментария методов исследования систем массового обслуживания проведен сравнительный анализ централизованного и децентрализованного вариантов построения транспортно-складской системы гибкого автоматизированного производства. Для альтернативных вариантов компоновочных схем приводятся расчетные формулы загрузки элементов транспортно-складской системы и основных аналитических показателей, включая коэффициент простоя. На основе этих формул определены оптимальные параметра ТСС, в том числе: объемы пристаночных накопителей, число обслуживаемых одним транспортным устройством станков и др. Показано, что централизованный вариант компоновки транспортно-складской системы отвечает базовым условиям мелкосерийного производства. С ростом серийности целесообразно применять децентрализованный вариант компоновки, обеспечивающий возможность оперативной коррекции сменно-суточных заданий для автоматизированных участков и отдельных станков.

Ключевые слова: *гибкое автоматизированное производство, транспортно-складская система, элементы транспортно-складской системы гибкого автоматизированного производства, централизованный и децентрализованный варианты компоновок, системы массового обслуживания, серийность производства, параметры СМО, коэффициенты загрузки и простоя оборудования, эффективность работы транспортно-складской системы.*

Khalikov M. A.

*Doctor of Science (Economics), professor,
professor of mathematical methods in economics department
Plekhanov Russian University of Economics,
member of International Academy
of Production Engineering Science and Practice,
e-mail: mihail.alfredovich@mail.ru*

Selecting the layout structure of the transport and storage system of flexible automated manufacturing

In this article, based on the tools of research methods of queuing systems, a comparative analysis of centralized and decentralized variants of transport and storage systems of flexible manufacturing was done. For alternatives layout schemes formulas of download elements of transport – warehouse system and the basic analytical parameters are calculated, including the rate of inactivity. On the basis of these formulas the optimal parameters of TCC are determined, including volumes drives, the number one transport unit serviced machines and others. It is shown that a centralized version of the layout of transport and storage system meets the basic conditions of small-scale production. With the growth of seriality is expedient to use a decentralized version of the layout, providing the possibility of surgical correction of shift-day tasks for automated sites and individual machines.

Keywords: flexible automated production, transport and storage system, elements of the transport and storage system of flexible automated production, centralized and decentralized options for layouts, queuing systems, serial production, the parameters of the Q.S., utilization rates and idle equipment, the efficiency of transport and storage system.

Одной из основных проблем проектирования транспортно-складской системы (ТСС) автоматизированного производства (ГАП) является выбор типа компоновочной структуры (КС), Рассмотрим два основных варианта построения КС.

1) Централизованный вариант КС ГАП, включающего М станков (рис. 1).

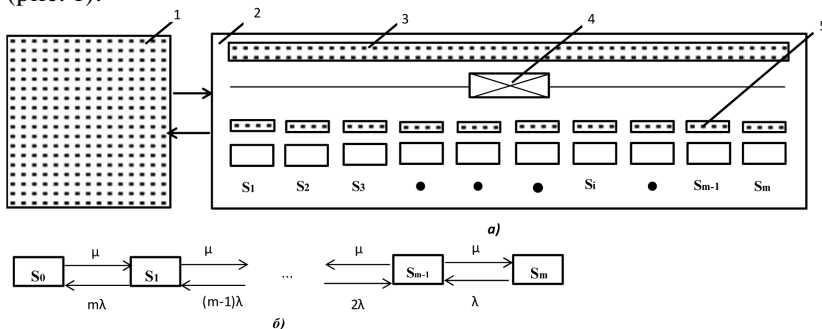


Рис. 1. Централизованный вариант КС ГАП

а) графическая интерпретация модели ТСС;

б) 1 – цеховой склад; 2 – ГАП; 3 – межоперационный склад-накопитель; 4 – транспортное устройство (ТУ); 5 – пристаночный накопитель (ПН).

Предположим, что емкость межоперационного склада-накопителя не ограничена, а емкость пристаночного накопителя, осуществляющего транспортную развязку, минимальна и равна трем позициям. Рассмотрим ситуацию, когда в каждый момент времени заняты две из трех позиций: позиции ожидания и эвакуации не могут быть заняты одновременно.

Перемещение тары с обработанными деталями из позиции загрузки-разгрузки в позицию эвакуации обеспечивает автоматическую выдачу заявки на отправку полной тары на склад. Одновременно перемещение тары с заготовками из позиции ожидания в позицию загрузки-разгрузки обеспечивает выдачу заявки на доставку до склада новой тары. При обслуживании станков транспортное устройство, как правило, устанавливает в позицию ожидания тару с заготовками и одновременно забирает из позиции эвакуации тару с готовыми деталями. Предполагается, что дисциплина обслуживания определяется очередностью удовлетворения требований в соответствии с порядком поступления заявок.

При такой постановке задачи ТСС представляет собой систему массового обслуживания (СМО). В каждый момент времени он находится в одном из $(S_M + 1)$ состояний: $S_0, S_1, \dots, S_s, \dots, S_M$, где S_0 – состояние, когда нет заявок от станков нет ни одной заявки; S_M – состояние, когда имеются заявки на обслуживание от M станков.

Для решения задачи в общем виде можно считать, что время обслуживания подчиняется пуассоновскому закону распределения с параметром μ , а время обработки деталей из одной тары – закону распределения с параметром λ : $1/\mu$ – среднее время обслуживания ТУ, $1/\lambda$ – среднее время обработки деталей из одной тары на станке [1].

В этом случае интенсивность перехода системы из состояния s в состояние $(s + 1)$ будет равна $(M - s)\lambda$, где $(M - s)$ – число станков, от которых может поступить заявка на обслуживание, если ТУ находится в состоянии $(s - M)$. Интенсивность перехода ТУ из s -го состояния в $(s - 1)$ – e , равна μ , так как в каждый момент времени оно может обслужить не более одного станка (интерпретация модели приведена на рис. 1 б).

Таким образом, функционирование ТСС представляет собой процесс «гибели и размножения». Дифференциальные уравнения установившегося режима превращаются в алгебраические:

$$\begin{aligned}
 M\lambda p_o &= \mu p_1; \\
 [(M-1)\lambda + \mu] p_1 &= M\lambda p_o + \mu p_2; \\
 &\dots\dots\dots \\
 [(M-s)\lambda + \mu] p_s &= (M-s+1)\lambda p_{s-1} + \mu p_{s+1}; \\
 &\dots\dots\dots \\
 \lambda p_{M-1} &= \mu p_M,
 \end{aligned} \tag{1}$$

где p_s – вероятность СМО нахождения в s – M состоянии.

Систему (1) преобразуем к виду:

$$\begin{aligned}
 M\lambda p_o &= \mu p_1; \\
 (M-1)\lambda p_1 &= \mu p_2; \\
 &\dots\dots\dots \\
 (M-s)\lambda p_s &= \mu p_{s+1}; \\
 &\dots\dots\dots \\
 \lambda p_{M-1} &= \mu p_M.
 \end{aligned} \tag{2}$$

Решение системы (2):

$$P_s = \frac{M!}{(M-s)!} p^s p_0, \tag{3}$$

$$\text{где } p = \frac{\lambda}{\mu}; p_0 = \frac{1}{1 + \sum_{s=1}^M \frac{M!}{(M-s)!} p^s}.$$

Введем коэффициент K_{np} простоя, под которым будем понимать отношение математического ожидания времени простоя станка к сумме математических ожиданий времен работы и простоя:

$$K_{np} = \frac{\bar{T}_{np}}{\bar{T}_p + \bar{T}_{np}} = \frac{\lambda \bar{T}_{np}}{1 + \lambda \bar{T}_{np}}, \tag{4}$$

где: $\bar{T}_p$ – математическое ожидание обработки на станке деталей из одной тары ($\bar{T}_p = \frac{1}{\lambda}$) – математическое ожидание времени простоя, на которое время ожидания обслуживания превышает время обработки деталей из одной тары:

$$\bar{T}_{np} = \sum_{S=0}^{M-1} p^S E(T_{np} / S), \quad (5)$$

где $E(\bar{T}_{np} / S)$ – среднее время простоя при условии, что в момент подачи заявки ТУ находилось в состоянии S .

Обозначим время обслуживания $\bar{T}_{обс}$. Тогда

$$T_{np} = \begin{cases} 0, & \text{если } T_{обс} \leq T_p \\ T_{обс} - T_p, & \text{если } T_{обс} > T_p. \end{cases} \quad (6)$$

Опуская промежуточные преобразования, получаем:

$$E(T_{np} / S) = E(T_{обс} / S) - \int_0^{T_p} \int_0^{T_p} p(T_{обс} / s) dT_{обс} + T_p \left(1 - \int_0^{T_p} p(T_{обс} / s) dT_{обс} \right) p_p(T_p) dT_p, \quad (7)$$

где: $E(T_{обс} / S)$ – среднее время обслуживания в момент подачи заявки в $s - M$ состоянии; $p(T_{обс} / S)$ – плотность распределения $T_{обс}$; $p_p(T_p) = \lambda e^{-\lambda T_p}$ – плотность распределения T_p .

$$\text{Заметим, что } T_{обс} / S = t_1 + t_2 + \dots + t_s + \bar{t}, \quad (8)$$

где: t_i – время обслуживания станка, имеющего в данный момент номер i в очереди ($i = 1, 2, \dots, S$), $\bar{t}$ – время обслуживания рассматриваемого станка.

Опуская промежуточные преобразования, получим:

$$\int_0^{T_p} T_{обс} p(T_{обс} / S) dT_{обс} = \frac{1}{\mu} \int_0^{\mu T_p} \frac{\tau_{обс}^{(s+1)}}{s!} e^{-\tau_{обс}} d\tau_{обс}, \quad (9)$$

где $\tau_{обс} = \mu T_{обс}$.

Аналогично:

$$\int_0^{T_p} T_{обс}^s p(T_{обс} / S) dT_{обс} = \int_0^{\mu T_p} \frac{\tau_{обс}^s}{s!} e^{-\tau_{обс}} d\tau_{обс}. \quad (10)$$

Так как табличный интеграл (10) раскрывается в виде:

$$\int_0^x x^k e^{-x} dx = k! \left(1 - \sum_{i=0}^k e^{-x} \frac{x^i}{i!} \right), \quad (11)$$

$$\text{то } \int_0^{T_p} T_{обс} p(T_{обс} / S) dT_{обс} = \frac{1}{\mu} \frac{(s+1)!}{s!} \left(1 - \sum_{i=0}^{s+1} e^{-x_p} \frac{\tau_p^i}{i!} \right), \quad (12)$$

где $\tau_p = \mu T_p$.

Поскольку $E(T_{обс} / S) = \lim_{T_p \rightarrow \infty} \int_0^{T_p} T_{обс} p(T_{обс} / S) dT_{обс}$, то

$$E(T_{обс} / s) = (s+1) / \mu \quad (13)$$

Опуская промежуточные преобразования, получим:

$$E(T_{np} / s) = \frac{p}{\mu} \int_0^{\infty} ((s+1) + \sum_{i=1}^s \frac{(s+1-i)}{i!} \tau_p^i) e^{-(1+p)\tau} d\tau_p. \quad (14)$$

Табличный интеграл (14) раскрывается в виде:

$$\int_0^{\infty} x^k e^{-x} dx = k!. \quad (15)$$

Опуская промежуточные преобразования получим:

$$E(T_{np} / s) = \frac{p}{(1+p)\mu} (s+1) + \frac{s(1+p)^s p - (1+p)^s + 1}{(1+p)^s p \mu}. \quad (16)$$

Коэффициент простоя станков для централизованной КС рассчитывается по формулам (3), (4), (5), (16).

2. Децентрализованный вариант КС ТСС также включает М станков (рис. 2а).

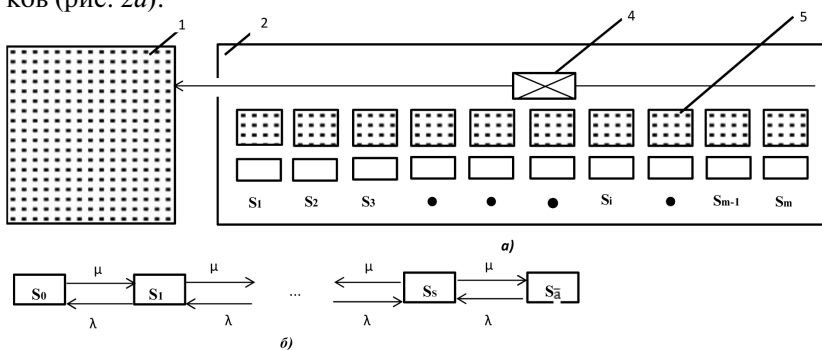


Рис. 2. Децентрализованная КС ГАП

а) графическая интерпретация модели ТСС; б) 1, 2, 4, 5 – то же, что и на рис. 1.

Приведенная КС характеризуется наличием развитых пристаночных складов-накопителей. Пристаночные накопители имеют $(\bar{a} + 1)$ позиций для тары. Возможны два способа загрузки накопителя заготовками (полуфабрикатами) для последующей обработки: одновременная загрузка всех позиций на длительное время работы станка во время сеанса связи пристаночного накопителя со складом и последо-

вательная загрузка одиночными тарами в течение всего времени работы станка («подпитка» накопителя).

В первом случае проблема простоев станков не возникает, так как они либо сведены к допустимому минимуму (за счет одновременной доставки всех тар с помощью дополнительных транспортных средств) или совмещены с остановкой станков на переналадку. Критическим с точки зрения простоев станка является второй случай. Для полноты картины заметим, что возможны комбинации централизованного и децентрализованного принципов построения ТСС, обеспечивающие повышение «живучести» системы. Ниже исследуется лимитирующая ситуация – модель децентрализованной КС в режиме «подпитки» пристаночного накопителя.

Если при централизованной КС ТУ 4 осуществляло связь между межстаночным складом-накопителем 3 и пристаночными накопителями 5, а обмен тар с деталями между цеховым складом 1 и накопителем 3 происходил с помощью других транспортных средств, то в рассматриваемом варианте при децентрализованной структуре ТУ 4 обслуживает непосредственно пристаночные накопители 5 и цеховой склад 1. При этом работа происходит следующим образом. Во время обработки деталей на станке из очередной тары подается заявка на обслуживание. Таким образом, в каждый момент времени число заявок от данного станка совпадает с числом тар с обработанными деталями в пристаночном накопителе. ТУ доставляет в пристаночный накопитель новую тару с заготовками и забирает тару с обработанными деталями. Общее число тар в пристаночном накопителе должно быть равно $\bar{a}$. Станок начинает простаивать в момент, когда заготовки из всех тар пристаночного накопителя обработаны.

В данном случае модель, рассмотренная выше, не может быть использована, так как имеется значительное число различных состояний пристаночных накопителей, которые определяют иную дисциплину обслуживания с позиции соответствующих приоритетов.

Будем предполагать, что каждый станок может находиться в одном из $(\bar{a} + 1)$ состояний $(s_0, s_1, \dots, s_{\bar{a}})$ (в соответствии с числом позиций, занятых тарами с необработанными заготовками). Графическая интерпретация состояний станка приведена на рис. 2 б.

В исследуемой модели устанавливается следующая дисциплина обслуживания: в первую очередь обслуживается станок, у которого в накопителе осталось меньшее число тар с необработанными заготовками. Если несколько станков имеют одинаковое число указанных тар, то приоритет определяется случайным розыгрышем. В этом случае

можно рассчитать значения интенсивности μ обслуживания станка при S занятых позициях накопителя. Если штабелер обслуживает станок, находящийся в состоянии S_s то это означает, что остальные станки находятся в состоянии с неменьшим номером (т.е. все остальные станки имеют такое же или большее число тар с необработанными деталями). Вероятность обслуживания ТУ станка, если последний находится в состоянии S :

$$p_{обс, S} = \sum_{s=1}^{M-1} \frac{1}{s+1} C_{M-1}^S p_s^S q_{s+1}^{M-1+s}, \quad (17)$$

где: C_{M-1}^S — биномиальный коэффициент; p_s — вероятность нахождения станка в состоянии S ; q_s — вероятность нахождения станка в состоянии с номером, равным или большим S .

Из (17) получим:

$$p_{обс, S} = \frac{q_s^M - q_{s+1}^M}{M \cdot p_s}, \quad (18)$$

откуда

$$\mu_s = \mu p_{обс, S} = \frac{\mu}{M} \cdot \frac{q_s^M - q_{s+1}^M}{p_s}. \quad (19)$$

Таким образом составим дифференциальные уравнения процесса:

$$\begin{aligned} C \frac{dp_a}{dt} &= -\lambda p_a - \frac{\mu}{M} (q_a^M - q_{a-1}^M); \\ \frac{dp_s}{dt} &= \lambda (-p_s + p_{s+1}) + \frac{\mu}{M} (q_{s+1}^M - 2q_s^M + q_{s-1}^M). \\ &\dots\dots\dots \\ \frac{dp_0}{dt} &= \lambda p_1 + \frac{\mu}{M} (q_1^M - q_0^M). \end{aligned} \quad (20)$$

Взяв малое Δt и воспользовавшись приведенными уравнениями, можно последовательно построить траекторию движения $p_0, \dots, p_a$ к стационарным значениям. Начальные условия работы станков: $p_a = 1$, $p_s = 0$ при $s = 0, \dots, a-1$, p_0 — вероятность пребывания станка состоянии простоя.

На основе изложенной методики проведен анализ централизованной КС со следующими параметрами: $M = 10$ станков; $\mu = 1$ мин.⁻¹; $\lambda = 0,02$ мин.⁻¹ [2].

Зададимся критерием отбора решений в виде допустимого простоя станка в ожидании обслуживания в объеме 0,1% эффективного

фонда времени работы станка. Такое значение меньше допустимого простоя станков в ожидании обслуживания, составляющего при нормальной эксплуатации ГАП в среднем 0,3% эффективного фонда времени. Принятое в расчетах значение означает практическое отсутствие простоев станков в ожидании обслуживания.

При эффективном сменном фонде, равном 432 мин., и коэффициенте использования оборудования, равном 0,7, время простоя станка составляет 0,32 мин., $K_{np} = 0,00064$, а суммарное время простоев всех станков за смену составляет 1,94 мин.

При $M = 20$ и тех же исходных данных получаем $T_{np} = 0,057$, $K_{np} = 0,0011$, а суммарное время простоев всех станков за смену составляет 6,65 мин., что при принятом допустимом значении простоя одного станка является верхним пределом. Следовательно, для совокупности приведенных параметров можно заключить, что одно ТУ в состоянии обслужить не более 20 станков.

Проведен анализ децентрализованной КС в широком диапазоне значений параметров: $M = 10, 20, 50, 100$, $T_{обс} = 0,5; 1,0; 2,0; 3,0; 4,0; 5,0$ мин.; $T_p = 5; 10; 25; 50; 100; 250; 500$ мин. (здесь T_p , $T_{обс}$ – время обработки и обслуживания). Применительно к рассматриваемой задаче была составлена программа определения вероятностей $p_0, \dots, p_a$ при $K_{np} = 0,001$.

В результате расчетов для всех совокупностей значений исходных параметров определялись вместимости пристаночных накопителей (число позиций ожидания), гарантирующие соблюдение нормы простоя, и максимальное число станков, которые могут быть обслужены одним ТУ. Расчет повторялся для ряда состояний, соответствующих различным значениям вместимости пристаночного накопителя (рис. 3).

Сплошной жирной линией на рисунке обозначена граница области сочетаний параметров, обеспечивающих неопустошение накопителя и соблюдение условия $1/p \geq M$. В диапазоне приведенных выше параметров $T_{обс}$ и T_p практический интерес представляют 15 значений p , отмечены в диаграмме по оси ординат. Цифрами 2–6 обозначены вместимости пристаночных накопителей. Полученные результаты позволяют заключить, что в децентрализованных КС минимальная вместимость пристаночных накопителей, гарантирующая соблюдение установленного выше минимального уровня простоев станков в ожидании обслуживания составляет 2–6 позиций. Иными словами, конструкция накопителя с учетом позиций загрузки-разгрузки и эвакуации должна предусматривать общее число позиций 4–8.

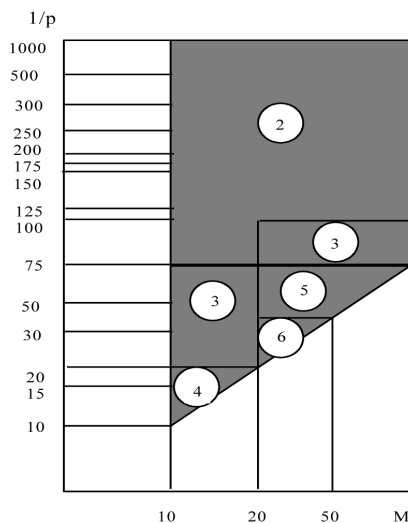


Рис. 3. Диаграмма выбора вместимости пристаночного накопителя

Приведенное исследование позволяет очертить область применения централизованных КС: мелкосерийное производство. При увеличении серийности производства повышается целесообразность применения децентрализованных КС, при проектировании которых важно учитывать полученные выше результаты. Вместе с тем следует иметь в виду, что в децентрализованных КС трудно реализовать высокую степень автоматизации транспортных операций, а также осуществить корректировку сменных заданий рабочим позициям при отказах отдельных станков.

Используемые источники

1. Ивченко Г.И., Каштанов В.А., Коваленко И.Н. Теория массового обслуживания: Уч. нос. — Изд. 2-е, Испр. и доп. — М.: Книжный дом «Либроком», 2012. — 304 с.
2. Халиков М.А. Моделирование производственной и машиностроительной стратегий машиностроительного предприятия. — М.: Изд-во ООО Фирма «Благовест — В», 2003. — 304 с.