

## Анализ влияния неравномерности производственных операций на эффективность выталкивающей производственной системы

© 2015 Поручиков Михаил Алексеевич  
Самарский государственный аэрокосмический университет  
им. академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет)  
443086, г. Самара, Московское шоссе, д. 34  
E-mail: mporuchikov@mail.ru

Построена имитационная модель выталкивающей производственной системы. Выявлена эмпирическая зависимость загрузки оборудования от неравномерности производственных операций. Проведен количественный анализ влияния неравномерности производственных операций на загрузку оборудования.

**Ключевые слова:** выталкивающая производственная система, производственная операция, неравномерность, имитационное моделирование, эффективность, загрузка оборудования.

### Введение

Одним из необходимых условий обеспечения конкурентоспособности производственных предприятий является наличие эффективной производственной системы. На эффективность производственных процессов оказывают влияние самые разнообразные факторы, одним из которых выступает нестабильность длительности производственных операций. Известны исследования влияния этого фактора<sup>1</sup>. Имеются выводы о негативном влиянии неравномерности на эффективность производственных процессов<sup>2</sup>. Актуальной является задача количественной оценки влияния различных факторов на эффективность производственных систем.

### Постановка задачи

Эффективность производственных систем может быть оценена с помощью большого количества показателей. Одним из важнейших показателей эффективности является коэффициент загрузки оборудования

$$K_3 = \frac{T_{\text{факт}}}{T_{\text{фонд}}}, \quad (1)$$

где  $T_{\text{факт}}$  - фактическая загрузка оборудования;

$T_{\text{фонд}}$  - фонд машинного времени.

Фактическая загрузка оборудования, в свою очередь, определяется на основе времени производственного цикла

$$t_i^H = t_i^{OK} - t_i^{нач}, \quad (2)$$

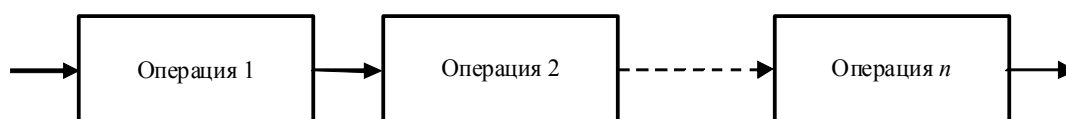


Рис. 1. Схема производственного процесса

где  $t_i^{нач}$  - время начала обработки  $i$ -й детали;

$t_i^{OK}$  - время окончания обработки  $i$ -й детали.

Среднее время производственного цикла для партии деталей

$$T_{ц} = \sum_{i=1}^m \frac{t_i^H}{m}, \quad (3)$$

где  $m$  - размер партии деталей.

Таким образом, для определения коэффициента загрузки необходимо определить время начала и окончания каждой производственной операции.

Предположим, что производственная система обладает следующими свойствами:

1. Технологический процесс состоит из нескольких последовательно выполняемых операций (рис. 1).

2. Каждая операция выполняется одной единицей оборудования.

3. В ходе каждой производственной операции одновременно может обрабатываться только одна деталь.

4. Детали поступают на обработку в соответствии с правилом "первый пришел - первый обслужен".

5. Длительность операций распределена нормально.

6. Детали поступают на первую производственную операцию равномерно.

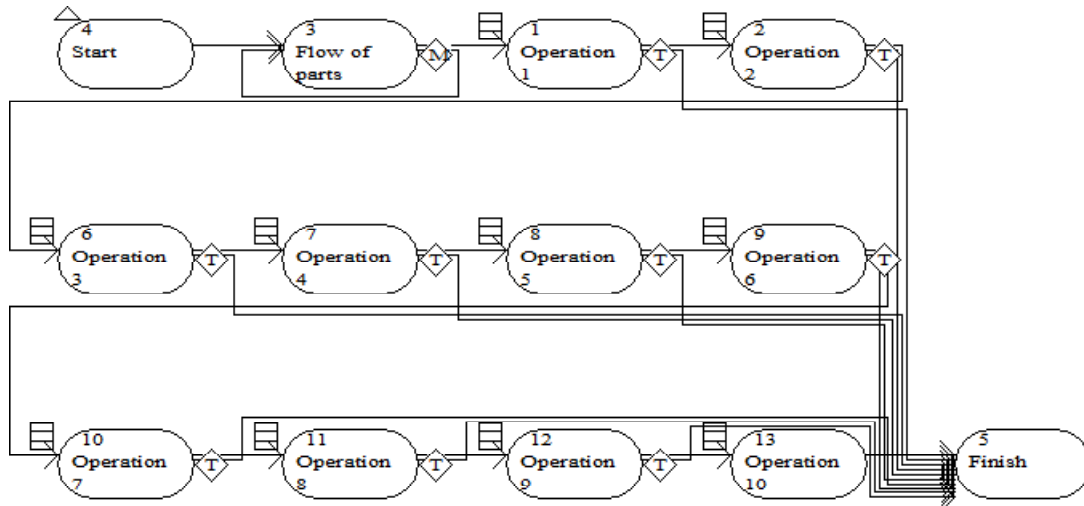


Рис. 2. Сетевая схема модели в среде Microsaint

7. Производственный процесс сбалансирован, т.е. операции имеют одинаковую среднюю длительность:

$$\overline{t_1^{on}} = \overline{t_2^{on}} = K = \overline{t_n^{on}}. \quad (4)$$

В качестве показателя неравномерности операций удобно использовать коэффициент вариации, представляющий собой отношение стандартного отклонения длительности операции к ее среднему значению:

$$V = \frac{\sigma_{on}}{t_{on}}. \quad (5)$$

Также можно предположить, что технологические процессы разной протяженности, т.е. различающиеся количеством операций, будут иметь разные свойства.

Таким образом, задача сводится к поиску и анализу эмпирической зависимости коэффициента загрузки от коэффициента вариации при разном количестве операций в производственном процессе:

$$K_3 = f(V, N_{on}). \quad (6)$$

### Модель

Описанная производственная система представляет собой систему массового обслуживания. Наиболее популярным подходом к исследованию систем массового обслуживания является дискретно-событийное имитационное моделирование<sup>3</sup>. Таким образом, для поиска зависимости (6) необходимо построить имитационную модель описанной системы.

Одним из инструментов дискретно-событийного моделирования служит программное обеспечение Microsaint<sup>4</sup>. Модель производственной системы в среде Microsaint включает следующие компоненты: сетевую схему; набор переменных, опи-

сывающих состояние моделируемой системы; правила взаимодействия элементов системы; механизм сбора экспериментальных данных. Сетевая схема описанной модели представлена на рис. 2.

### Эксперимент

Эксперимент состоит из набора опытов, каждый из которых имитирует обработку партии деталей. Опыты отличаются друг от друга значениями коэффициента вариации и количества операций.

Для проведения опытов выбрана дискретная сетка из 11 значений коэффициента вариации в диапазоне от 0 до 0,5 с шагом 0,05 и дискретная сетка из 10 значений количества операций в диапазоне от 1 до 10 с шагом 1. Такая сетка дает 110 различных сочетаний коэффициента вариации и количества операций. Для повышения точности эксперимента опыты с одинаковыми сочетаниями коэффициента вариации и количества операций были проведены в среднем по 100 раз. Таким образом, в ходе эксперимента проведено 110x100=11 тыс. опытов.

В результате эксперимента получен набор данных, содержащий следующие показатели: номер опыта "run", значение коэффициента вариации "op\_time\_cv", количество операций "N\_or", суммарное время нахождения деталей в производстве "T\_sum", суммарное значение времени выполнения операций "T\_value", суммарное значение времени ожидания деталей "T\_wait" (табл. 1).

После проведения эксперимента выполнена обработка экспериментальных данных, состоящая в расчете коэффициента загрузки и его усреднении по опытам с одинаковым коэффициентом вариации и количеством операций, в результате чего получен массив данных размером 11x10 элементов (табл. 2).

Таблица 1. Фрагмент набора экспериментальных данных

run	op time cv	N op	T sum	T value	T wait
1	0,000	6	6000,000	6000,000	0,000
2	0,100	9	12052,930	9023,222	3029,710
3	0,000	2	2000,000	2000,000	0,000
4	0,100	4	5235,857	4009,375	1226,483
5	0,150	7	9675,448	6947,508	2727,943
6	0,350	10	20491,424	10046,756	10444,670
7	0,250	2	5037,882	1997,806	3040,076

Таблица 2. Значения коэффициента загрузки

К-т вариации	Количество операций								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,00	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,05	0,819	0,813	0,844	0,849	0,856	0,863	0,865	0,867	0,874
0,10	0,696	0,719	0,746	0,752	0,758	0,757	0,767	0,775	0,781
0,15	0,628	0,604	0,636	0,670	0,664	0,679	0,679	0,689	0,698
0,20	0,550	0,571	0,599	0,606	0,604	0,611	0,626	0,632	0,642
0,25	0,518	0,484	0,510	0,539	0,540	0,557	0,558	0,568	0,579
0,30	0,458	0,468	0,498	0,495	0,513	0,518	0,532	0,541	0,542
0,35	0,437	0,382	0,444	0,460	0,461	0,468	0,482	0,486	0,497
0,40	0,388	0,394	0,416	0,423	0,435	0,445	0,454	0,468	0,475
0,45	0,346	0,319	0,367	0,394	0,396	0,396	0,411	0,420	0,435
0,50	0,300	0,328	0,357	0,365	0,367	0,383	0,394	0,404	0,412

**Анализ результатов**

Экспериментальная зависимость коэффициента загрузки от коэффициента вариации для технологических процессов различной протяженности приведена на рис. 3.

Эмпирическая зависимость коэффициента загрузки от коэффициента вариации и количества операций достаточно хорошо ( $R^2 = 0,9895$ ) описывается регрессионной моделью:

$$K_3^* = 9,31 \cdot 10^{-1} - 2,36 \cdot V + 1,05 \cdot 10^{-2} \cdot N_{on} + 1,75 \cdot 10^{-2} \cdot V \cdot N_{on} + 2,16 \cdot V^2 - 4,71 \cdot 10^{-4} \cdot N_{on}^2. \quad (7)$$

Графически зависимость (7) может быть представлена в виде поверхности в трехмерной декартовой системе координат (рис. 4).

Для дальнейшего анализа зависимость (7) удобно представить в двумерной системе координат (рис. 5) аналогично представлению экспериментальных данных (см. рис. 3).

Анализ соотношения (7) и диаграммы на рис. 5 позволяет сделать следующие выводы:

1. С ростом коэффициента вариации коэффициент загрузки уменьшается. Например, при

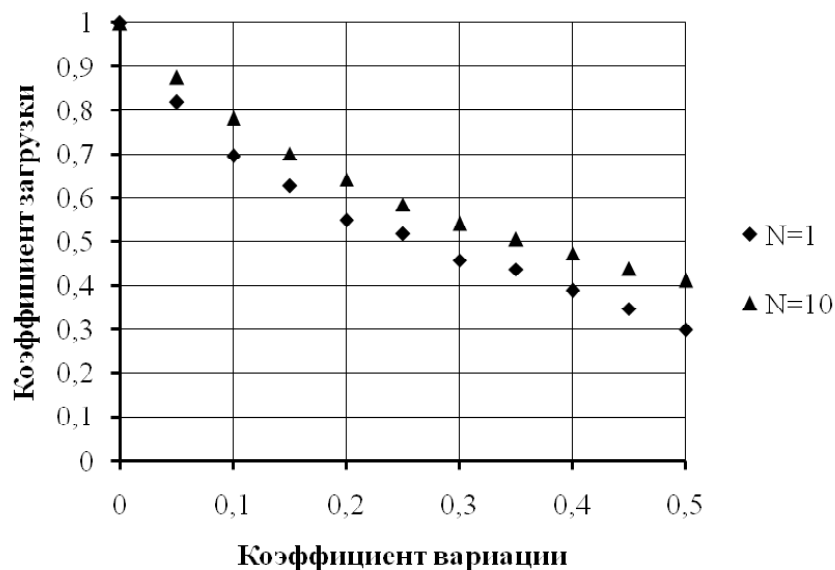


Рис. 3. Зависимость коэффициента загрузки от коэффициента вариации

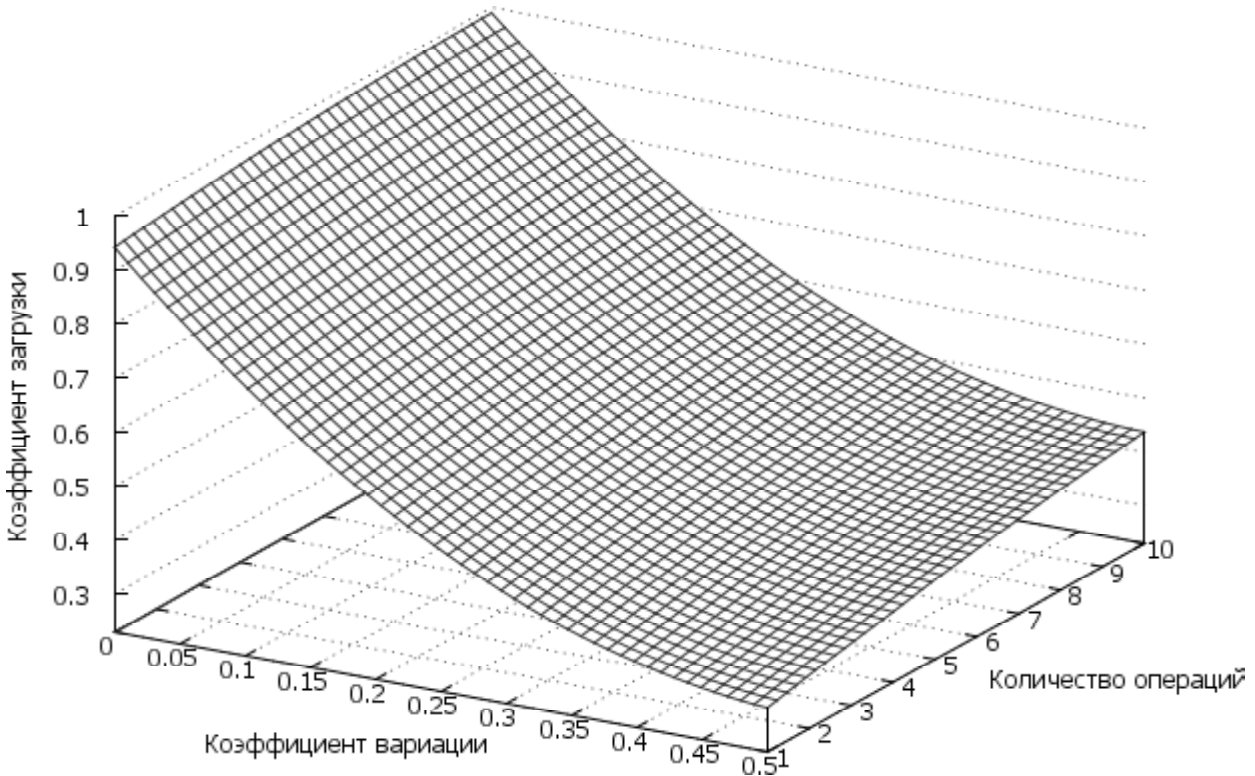


Рис. 4. Регрессионная модель коэффициента загрузки

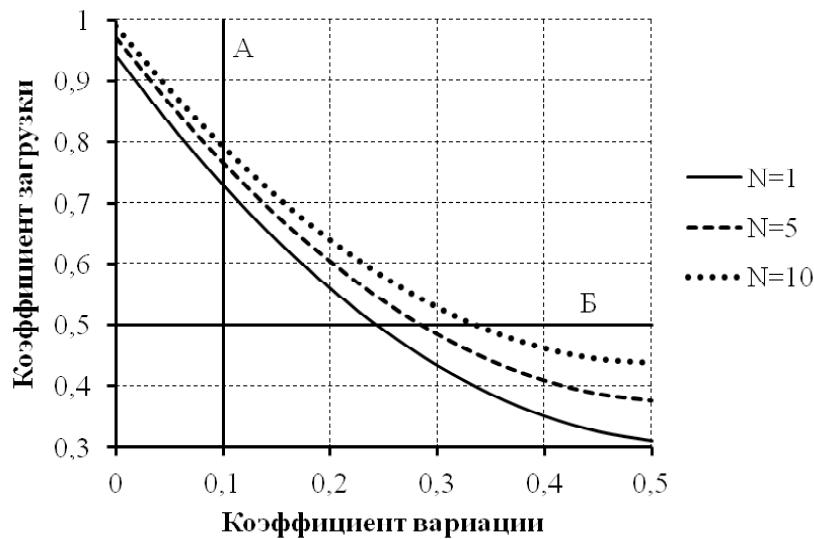


Рис. 5. Зависимость коэффициента загрузки от коэффициента вариации

изменении коэффициента вариации от 0 до 0,1 (см. рис. 5, линия А) коэффициент загрузки оборудования уменьшается на 19-21 % в зависимости от протяженности технологического процесса.

2. Зависимость коэффициента загрузки от коэффициента вариации имеет нелинейный характер.

3. Более протяженные технологические процессы более устойчивы к неравномерности опе-

раций. Так, коэффициент загрузки 0,5 достигается при коэффициенте вариации 0,25 для технологического процесса, включающего одну операцию; 0,54 для процесса из пяти операций; 0,58 для процесса из десяти операций (см. рис. 5, линия Б).

#### Заключение

По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Увеличение неравномерности производственных операций приводит к уменьшению эффективности производственной системы.

2. Протяженные технологические процессы более устойчивы к неравномерности производственных операций.

3. Для построения эффективных производственных систем необходимо выявлять и исключать факторы, способствующие неравномерному выполнению производственных операций.

4. Дискретно-событийное имитационное моделирование позволяет проводить количественный анализ производственных систем.

<sup>1</sup> Sarker B.R., Jfitzsimmons A. The performance of push and pull systems: a simulation and comparative study // International Journal of Production Research. 1989. Vol. 27, is. 10. P. 1715-1731.

<sup>2</sup> Zhao Y., Simchi-Levi D. Performance analysis and evaluation of assemble-to-order systems with stochastic sequential lead times // Operations Research. 2006. Vol. 54, is. 4. P. 706-724.

<sup>3</sup> Simulation in manufacturing and business: A review / M. Jahangiriana [et al.] // European Journal of Operational Research. 2010. Vol. 203, is. 1. P. 1-13.

<sup>4</sup> Кораблин М.А. Информатика поиска управленческих решений (+ CD-ROM). Москва, 2009.

*Поступила в редакцию 04.05.2015 г.*