



УДК 658.5.012.14

*С.Г. Редько, Е.В. Селезнева***ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ARENA ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЛИНИЙ***S.G. Redko, E.V. Selezneva***THE USAGE OF SIMULATION MODELING SYSTEM ARENA
FOR THE RESEARCH OF PRODUCTION LINES**

В статье рассмотрены задачи проектирования и поддержки функционирования и проведен анализ методов их решения: натурный эксперимент, математическое и имитационное моделирование. Проанализирован опыт применения имитационного моделирования для исследования производственных линий. Разработаны две типовые модели производственных линий (однопродуктовая и многопродуктовая) в среде имитационного моделирования Arena. Проведена верификация разработанных моделей с помощью анализа поведения «узкого места» и закона Литтла. Поставлены эксперименты с однопродуктовой моделью для оценки влияния партионности, поломок, вариабельности процессов, длины производственной линии на показатели эффективности: пропускную способность, среднее время потока, вероятность блокирования и простоя рабочих станций.

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ЛИНИИ, БЛОКИРОВАНИЕ, ПРОСТОЙ, ВАРИАБЕЛЬНОСТЬ, ПОЛОМКИ, ЭКСПЕРИМЕНТ, АЛГОРИТМ, ТИПОВАЯ МОДЕЛЬ, ДОПУЩЕНИЯ, ЗАКОН ЛИТТЛА, ПОКАЗАТЕЛИ ЭФФЕКТИВНОСТИ.

The design and operation approval goals were examined and the analysis of such methods of their solution as full-scale experiment, mathematical and simulation modeling was done in the article. The experience of simulation modeling for the production line research was analyzed. The two typical models were developed in the simulation software package Arena, one of which is single-product and the other is multi-product. The verification of developed models was done by the behavior analysis of the bottleneck and the Little's formula. The experiments with the single – product model were made in order to estimate the influence of batches, failures, process variability, production line length on such performance measures as throughput, average flow time, the downtime and blocking probability of workstations.

PRODUCTION LINES, BOTTLENECK, BLOKING, STARVATION, VARIABILITY, FAILURES, EXPERIMENT, ALGORITHM, TYPICAL MODEL, ASSUMPTIONS, LITTLE'S LAW, PERFORMANCE MEASURES.

В последние годы в России наблюдается преобладание непромышленной сферы над производственной. Однако промышленность и сельское хозяйство, по-прежнему, играют важную роль в экономике России. По данным Росстата, в 2012 году сельское хозяйство составило 4,5%, промышленность - 36,9%, сервис – 58,6% ВВП [1].

К проблемам, относящимся к промышленности, можно отнести необходимость решения задач проектирования и поддержки функционирования производственных линий. Произ-

водственные линии представляют собой последовательность операций, в результате прохождения которых на выходе появляются готовые изделия или полуфабрикаты. Интерес к задачам поддержки функционирования обусловлен необходимостью решения оперативных задач, стоящих перед любым производственным предприятием. К таким задачам можно отнести управление запасами, оптимизацию работы линии с учётом «узкого места», влияние отказов оборудования на показатели эффективности и т.д. В свою очередь, актуальность реше-

ния задач проектирования связана с ростом числа новых и развитием существующих предприятий, которые осуществляют модернизацию своих производственных линий по различным причинам, к числу которых можно отнести устаревание оборудования, изменение внешней среды, глобализацию рынков, передачу части производственных функций на аутсорсинг, необходимость снижения издержек [2].

Решение данных задач сводится к оценке значений показателей эффективности, к которым относятся пропускная способность, среднее время потока, вероятность простоя и блокирования рабочих станций, уровень запасов в буферах [3]. В качестве методов решений можно рассматривать проведение натурального эксперимента, имитационного и математического моделирования. Однако имитационное моделирование наиболее целесообразно, поскольку:

Позволяет оценить показатели эффективности сложных систем, которыми и являются производственные линии [4, 5, 6, 7].

Затрачивает меньше временных и денежных средств по сравнению с натурным экспериментом.

Имитационные модели являются более гибкими и реалистичными по сравнению с математическими моделями [8].

Большинство разработанных на сегодняшний день имитационных моделей описывает поведение конкретных производственных линий и не может быть использовано на различных предприятиях, то есть не существует типовых моделей производственных линий.

В рамках данного исследования были разработаны две типовые имитационные модели производственных линий - однопродуктовая и многопродуктовая. Однопродуктовая модель имитирует производственный процесс, в результате которого выпускается один вид продукции. В многопродуктовой модели имитируется процесс производства нескольких видов продукции [9]. Разработанные типовые имитационные модели производственных линий направлены на оценку показателей их эффективности с учётом действующих на них факторов. В типовых моделях эффективность производственных линий оценивается с помощью таких показателей, как пропускная способность,

среднее время потока, средний уровень запасов в буферах, вероятность простоя и блокирования рабочих станций. При проектировании линий именно эти параметры являются ключевыми для оценки их эффективности в независимости от отрасли промышленности. При этом в типовых моделях учитываются такие факторы, присущие всем производственным линиям и влияющие на показатели их эффективности, как поломки оборудования и ремонт, партионность, вариабельность времени выполнения операций на рабочих станциях, длина производственных линий. Типовые модели предусматривают задание пользователем значений факторов под конкретную производственную линию.

Разработанные типовые модели пригодны для моделирования любой линии дискретного производства, для которой выполняются принятые при их разработке допущения:

Каждая станция представляет собой отдельную операцию.

Производственные линии имеют один маршрут следования.

Производственные линии работают в выталкивающем режиме.

Рабочие станции территориально расположены друг за другом, вследствие чего продукция передается из буфера одной станции на следующую за ней без использования дополнительных транспортных средств.

Размер буфера между рабочими станциями ограничен.

Любая производственная линия, не противоречащая данным требованиям, может быть исследована с помощью разработанных типовых моделей.

Основными допущениями, принятыми к типовым моделям, являются следующие: рабочая станция блокируется, если в буфере следующей за ней рабочей станции нет свободного места, размер партии не может превышать размер буфера. Рабочая станция предназначена для осуществления производственных процессов и представляет собой территориальное пространство, на котором располагается оборудование, операторы и буфер [5]. Буфер представляет собой территорию для хранения незавершенной продукции, находящуюся перед каждой рабочей станцией. В типовых моделях

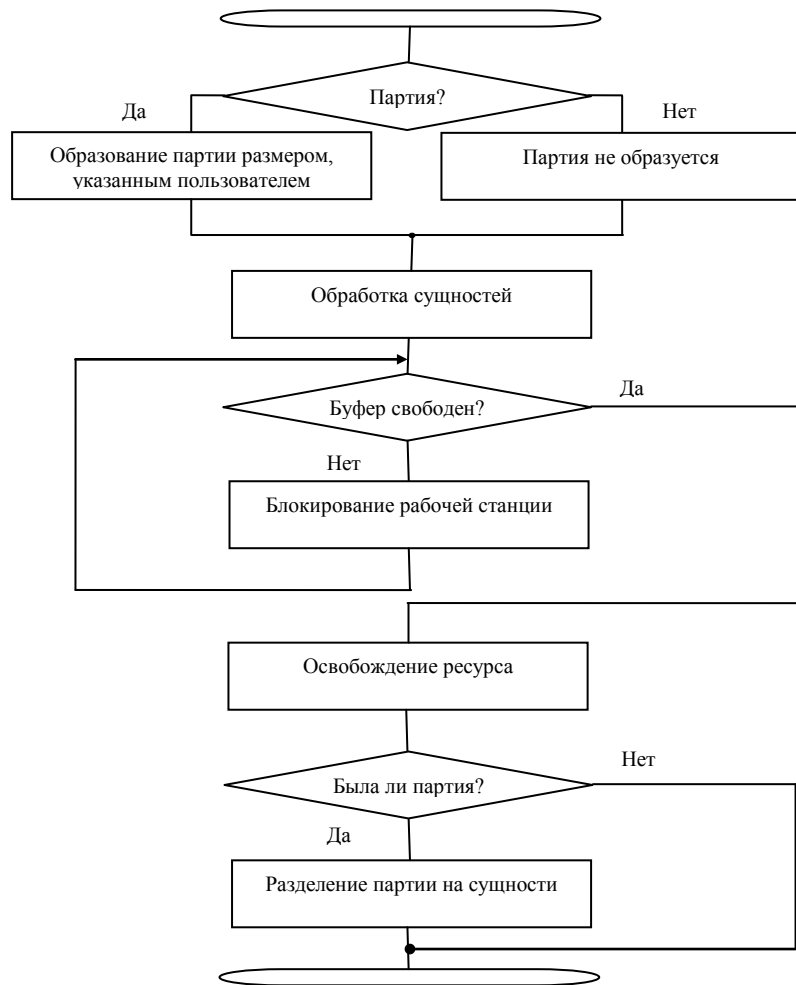


Рис. 1. Блок-схема работы сегмента типовой модели

размер буферного пространства между рабочими станциями (Buffer size), время выполнения операций для каждой рабочей станции (Processing time) и размер партии (Batch size) являются параметрами и могут задаваться пользователем.

Каждая модель строится из набора типовых сегментов, соответствующих отдельной рабочей станции линии. Алгоритм работы типового сегмента представлен в виде блок-схемы на рис. 1.

Сначала определяется то, как будет происходить обработка на данной станции (поштучно или партиями). Далее, в случае незанятости ресурса, осуществляется обработка. В противном случае, единица (партия) становится в очередь на обработку ресурсом до его освобо-

ждения. Обработанные единицы поступают в буфер следующей рабочей станции, при условии наличия свободного места в нём, и ресурс текущей станции становится свободным. Если буфер следующей рабочей станции занят, то обработанные единицы задерживаются на данной рабочей станции до освобождения буфера следующей за ней станции (станция блокируется). Далее, при необходимости, партия разделяется на отдельные единицы и поступает на вход следующего сегмента, принцип работы которого повторяется. Логика работы последнего сегмента в модели отличается от работы других сегментов отсутствием условия блокирования.

Типовая модель производственной линии, разработанная в среде имитационного модели-

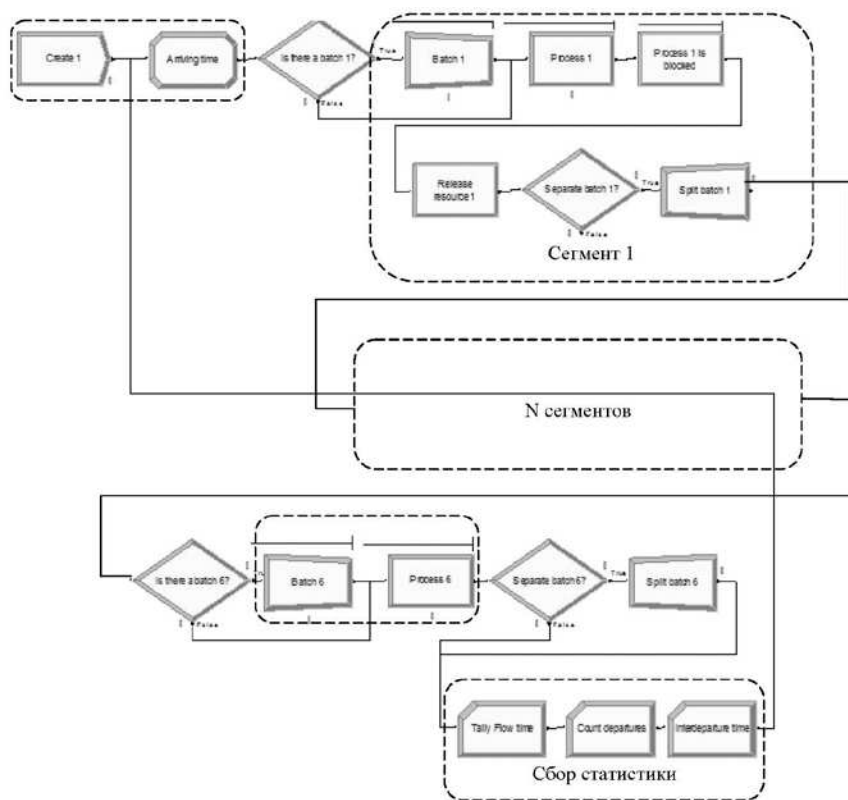


Рис. 2. Типовая модель производственной линии

рования Agena, представлена на рис. 2. В данной модели первые два блока имитируют поступление заданий на вход линии, темп которого, как правило, задается по закону Пуассона, что соответствует экспоненциальному распределению интервала времени поступления заданий. Среднее значение, являющееся параметром экспоненциального распределения, равно среднему значению времени выполнения заданий в «узком месте» системы. Именно поэтому одна из форм верификации моделей заключается в соответствии ее закону Литтла, который характеризует работу системы в стабильном состоянии. Типовая модель предусматривает возможность изменения пользователем закона распределения для конкретной линии без структурных изменений модели.

Третий блок определяет способ обработки единиц: поштучно или партиями. Последующие 6 блоков имитируют алгоритм работы типового сегмента, описанного выше. Число сегментов в модели определяется длиной кон-

кретной линии. В последнем сегменте отсутствуют модули проверки блокировки. Завершающие блоки обеспечивают сбор пользовательской статистики, описанной далее.

Пользовательские настройки разработанных типовых моделей производственных линий можно разделить на специальные настройки и стандартные настройки, предусмотренные системой моделирования Agena по умолчанию. Специальные настройки обеспечивают задание таких параметров моделей, как время обработки, размер партии и размер буфера каждой рабочей станции. К стандартным входным настройкам относятся настройки, связанные с партиями, ресурсами, очередями и полочками [10]. Такой подход делает модели гибкими для настройки значений параметров под различные варианты производственных линий.

Выходную статистику, получаемую в результате моделирования типовых моделей, можно разделить на автоматические отчеты и отчеты, определенные пользователем [10].

Т а б л и ц а 1

Выходная статистика типовых моделей

Вид статистики	Собираемая статистика	
Автоматические отчёты	Сущность	Значение количества вошедших сущностей
		Значение количества вышедших сущностей
		Среднее, максимальное и минимальное значение запасов в буферах
	Очередь	Среднее, максимальное и минимальное значение количества сущностей в очереди
		Среднее, максимальное и минимальное значение времени ожидания в очереди
	Ресурс	Среднее, максимальное и минимальное фактическое значение использования ресурсов
Среднее, максимальное и минимальное запланированное значение использования ресурсов		
Отчёты, определённые пользователем	Время потока Количество покинувших систему сущностей Время между входами сущностей Проход Вероятность нахождения ресурса в различных состояниях, в том числе и вероятность простоя Вероятность блокирования рабочих станций	



Рис. 3. График зависимости пропускной способности от размера партии

Данная статистика представлена в табл. 1.

Верификация разработанных типовых моделей при работе линии в стационарном режиме подтверждена выполнением закона Литтла:

$$I = R * T (1),$$

где I – средний уровень запасов, R – пропускная способность (проход), T – среднее время потока.

Верификация однопродуктовой модели была проведена также посредством анализа пове-

дения «узкого места», который подтвердил адекватность модели.

С однопродуктовой типовой моделью проведены эксперименты для оценки влияния партионности, поломок, вариабельности процессов, длины производственной линии на пропускную способность, среднее время потока, вероятность блокирования и простоя оборудования.

При анализе влияния размера партии на показатели эффективности были получены следующие результаты: при увеличении размера

Т а б л и ц а 2

Зависимость пропускной способности и среднего времени потока от действующих на них факторов

Показатель эффективности	Зависимость		
	Сильная (более 40 %)	Средняя (10 % - 40 %)	Слабая (менее 10 %)
Пропускная способность (-)	Размер партии Блокирование «узкого места» Простой «узкого места» Поломки «узкого места»	Поломки станции, стоящей перед «узким местом»	Длина линии Вариабельность процессов
Среднее время потока (+)			

партии пропускная способность падает, среднее время потока увеличивается, вероятность блокирования рабочих станций падает, а вероятность их простоя увеличивается. Зависимость пропускной способности от размера партии представлена на рис. 2. Зависимость среднего времени потока от размера партии обратно - пропорциональна зависимости пропускной способности от размера партии.

Результаты других экспериментов представлены в таблице 2. Здесь указано направление связи (положительная или отрицатель-

ная), а также сила связи, в зависимости от того, насколько процентов меняются выходные параметры при изменении входных параметров.

Результаты проведенных экспериментов показывают возможность практического применения разработанных моделей для оценки влияния таких факторов, как случайные поломки оборудования, вариабельность времени выполнения операций, длина линии, размера партии на параметры эффективности широкого круга производственных линий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сайт Федеральной Службы Государственной Статистики // URL: http://www.gks.ru/free_doc/new_site/vvp/tab10.xls (дата обращения: 03.11.2013).
2. **Грундиг К.Г.** Проектирование промышленных предприятий. Принципы. Методы. Практика / Пер. с нем. – М.: Альпина Бизнес Букс, 2007. – 340 с.
3. **Curry G.L., Feldman R.M.** Manufacturing modeling and analysis. – Springer, – 2009. – 327 p.
4. **Таха Х.А.** Введение в исследование операций / Пер. с англ. – 2-е изд. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2005. – 912 с.
5. **Altiok T., Melamed B.** Simulation modeling and analysis with Arena. B. – Elsevier Inc, 2007. – 440 p.
6. **Шеннон Р.** Имитационное моделирование систем – искусство и наука. – М.: Мир, 1978. – 420 с.
7. **Шелухин О.И., Тенякшев А.М., Осин А.В.** Моделирование информационных систем / Под ред. О.И. Шелухина. Учебное пособие. – М.: Радиотехника, 2005. – 368с.
8. **Verma A.K., Ajit S., Karanki D.R.** Reliability and Safety Engineering. – Springer, 2010. – 535p.
9. **Papadopoulos C.T., O’Kelly M.E.J., Vidalis M.J., Spinellis D.** Analysis and Design of Discrete Part Production Lines. – Springer, 2009. – 279 p.
10. **Kelton W., Sadowski R., Swets N.** Simulation with Arena. McGraw Hill Education, 2009. 656 p.

REFERENCES

1. Federal State Statistic Service Website // URL: http://www.gks.ru/free_doc/new_site/vvp/tab10.xls (accessed 03.11.2013)
2. **Grundig K.G.** The design of industrial enterprises. Principles. Methods. Practice. Moscow, Alpina Business Books, 2007. 340 p.
3. **Curry G.L., Feldman R.M.** Manufacturing modeling and analysis. – Springer, – 2009. – 327 p.
4. **Taha H.A.** Operations research: an introduction. Moscow, Williams, 2005. 912 p.
5. **Altiok T., Melamed B.** Simulation modeling and analysis with Arena. B. Elsevier Inc, 2007. – 440 p.
6. **Shannon R.** Systems simulation: the art and science. Moscow, Mir, 1978. 440 p.

7. **Sheluhin O.I., Tenyakshev A.M., Osin A.B.** Information systems modeling. Moscow, Radiotechnic. 2005. 368 p.

8. **Verma A.K., Ajit S., Karanki D.R.** Reliability and Safety Engineering. – Springer, 2010. – 535p.

9. **Papadopoulos C.T., O’Kelly M.E.J., Vidalis M.J., Spinellis D.** Analysis and Design of Discrete Part Production Lines. – Springer, 2009. – 279 p.

10. **Kelton W., Sadovski R., Swets N.** Simulation with Arena. McGraw – Hill Education, 2009. – 656 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ/AUTHORS

РЕДЬКО Сергей Георгиевич – заведующий кафедрой Управления проектами, доктор технических наук; Санкт-Петербургский государственный политехнический университет; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: redko@acea.neva.ru

REDKO Sergey G. – St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: redko@acea.neva.ru

СЕЛЕЗНЕВА Екатерина Васильевна – аспирант; Санкт-Петербургский государственный политехнический университет; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: SeleznouvaK@gmail.com

SELEZNEVA Ekaterina V. – St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: SeleznouvaK@gmail.com