

*Препринт*

*Статья опубликована: Карпенко Д. Н. Оценка эффективности интеграции формовочного участка и литейного конвейера // Литейное производство. – 2015. – № 11. – С. 18–20.*

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНТЕГРАЦИИ ФОРМОВОЧНОГО УЧАСТКА И ЛИТЕЙНОГО КОНВЕЙЕРА НА ОСНОВЕ ВЕРОЯТНОСТНОГО ПОДХОДА

**Карпенко Денис Николаевич**

*Россия, Москва, Московский государственный технический университет  
им. Н. Э. Баумана (МГТУ им. Н. Э. Баумана),  
ассистент кафедры «Литейные технологии»  
[karpenko\\_dn@bmstu.ru](mailto:karpenko_dn@bmstu.ru)*

УДК 621.74.067

Использование непрерывно движущегося конвейера является одним из основных способов интеграции различных технологических участков. Скорость конвейера в конечном итоге определяет производительность всей системы. При ее выборе необходимо учитывать, что многие параметры технологической системы, в том числе длительность цикла, являются случайными величинами. На примере интеграции формовочного участка и литейного конвейера показана методика оценки эффективности интеграции, разработанная А. П. Куприяновым и уточненная автором статьи. Оценка эффективности производится на основании вычислительного эксперимента, проводимого с использованием метода Монте-Карло. Оценка ведется по обобщенному показателю, учитывающему не только итоговую производительность системы, но и среднюю занятость конвейера формами. Применение данной методики позволяет на основании данных хронометража дать рекомендации по выбору оптимальной скорости конвейера для конкретной системы.

Ключевые слова: конвейер, производительность, интегрированные системы, эффективность интеграции, метод Монте-Карло.

Application of continuously working conveyor is a main way of integration of different production areas. Eventually conveyor velocity determines productivity of whole system. For defining one it is necessary to take into consideration that many characteristics of production system including cycle time are random variates. Procedure for estimation of integration efficiency developed by A. P. Kupriyanov and improved by author is demonstrate for case of integration between moulding section and foundry conveyor. Estimation of efficiency is based on computing experiment carried out via Monte-Carlo method. Estimate is made by aggregate coefficient consider a total system productivity as well as an average conveyor occupancy by casting forms. By this procedure, it is possible to recommend the optimal conveyor velocity for specified system based on timekeeping results.

Keywords: conveyor, productivity, integrated system, integration efficiency, Monte-Carlo method.

*Памяти А. П. Куприянова*

Анатолий Павлович Куприянов (1934–2011), доцент кафедры «Литейные технологии» МГТУ им. Н. Э. Баумана – выдающийся ученый в области автоматизации литейного производства. Область его интересов охватывала широкий круг задач: от тех-

нической реализации систем управления и их программирования до математического описания работы автоматических линий. Одна из основных идей, нашедшая воплощение в работах Анатолия Павловича заключается в том, что моделирование производственных процессов должно вестись на основе теоретико-вероятностного подхода. В частности, из-за того, что параметры технологических систем зачастую подвержены случайным колебаниям, при объединении различных систем возникают эффекты, приводящие к потере производительности. Этот подход был положен в основу курса «Интегрированные компьютерные системы литья», разработанного А. П. Куприяновым, который читается студентам кафедры до настоящего времени.

Насколько известно, результаты этих исследований так и не были опубликованы в свое время. Целью данной статьи является не только представление этих результатов с использованием современных средств математического моделирования, но и попытка развития теоретико-вероятностного подхода А. П. Куприянова для оценки эффективности работы автоматических литейных линий.

Рассмотрим для примера интеграцию формовочного участка с литейным конвейером (рис. 1). В самом простом случае мы будем иметь некий автоматический комплекс по изготовлению разовых форм. За один цикл работы формовочный комплекс изготавливает одну литейную форму и выставляет ее на конвейер, непрерывно движущийся со скоростью  $v_k$ . Задача состоит в том, чтобы определить, какова должна быть скорость конвейера, чтобы обеспечить работу линии с максимальной эффективностью.

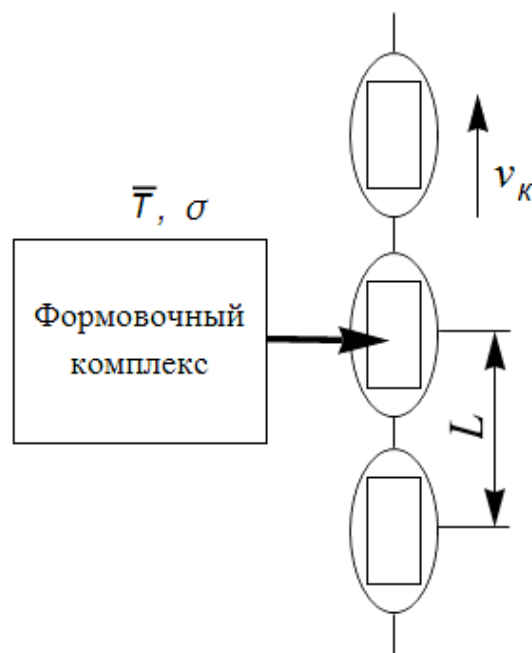


Рис. 1 – Схема интеграции формовочного участка с конвейером

Традиционный подход заключается в том, что скорость конвейера подбирается непосредственно под производительность формовочного участка. Например, если его производительность составляет  $\Pi$ , скорость конвейера должна составить

$$v_K = L \cdot \Pi = \frac{L}{\bar{T}}, \quad (1)$$

где  $L$  – расстояние между тележками конвейера;  
 $\bar{T}$  – средняя продолжительность цикла работы формовочного комплекса.

Однако производительность  $\Pi$  характеризует лишь средние значения длительности цикла. В каждом конкретном случае продолжительность изготовления формы является, по сути, случайной величиной и может быть как меньше, так и больше среднего значения. Поскольку мы рассматриваем непрерывно движущийся конвейер, в каждом случае, когда время цикла будет превышать среднее, тележка будет уходить с позиции формовки пустой. То есть не все тележки конвейера будут заполнены формами, что приведет к снижению общей производительности системы.

Можно оценить среднюю производительность этой системы. Пусть  $P(T < T_K)$  – вероятность того, что время конкретного цикла  $T$  окажется меньше, чем время  $T_K$ , за которое конвейер проходит расстояние  $L$  (это время в дальнейшем будем называть темпом конвейера). В этом случае формовочный комплекс успевает изготовить форму и выставить ее на очередную тележку. Если же время  $T$  оказывается больше  $T_K$ , очередная тележка уходит пустой, а форма выставляется на следующую. При этом мы предполагаем, что между формовочным комплексом и конвейером отсутствуют какие-либо накопители, то есть изготовление новой формы не может начаться, пока ранее изготовленная форма не ушла на конвейер.

Вероятность второго случая составит:

$$P(T > T_K) = 1 - P(T < T_K),$$

и если пренебречь вероятностью пропуска двух или более тележек подряд, средний темп выпуска форм в интегрированной системе составит:

$$T_{ИС} = T_K \cdot P(T < T_K) + 2T_K \cdot (1 - P(T < T_K)) = T_K \cdot (2 - P(T < T_K)). \quad (2)$$

Для оценки производительности интегрированной системы можно ввести коэффициент производительности  $h$ :

$$h = \frac{\bar{T}}{T_{ИС}}. \quad (3)$$

Если предположить, что распределение времени цикла симметричен относительно среднего, а темп конвейера равен средней продолжительности цикла, то  $P(T < T_R) = 0,5$ , и в соответствии с формулами (2) и (3):  $T_{ИС} = 1,5 T_K$ ;  $h = 0,667$ . Таким образом, при традиционном подходе потери производительности только за счет интеграции составляют до трети от паспортной производительности формовочного комплекса.

Для определения оптимальной с точки зрения общей производительности скорости конвейера А. П. Куприяновым предложено использовать метод Монте-Карло и некоторые подходы теории массового обслуживания, которые являются наиболее распространенными инструментами моделирования случайных процессов [1]. При этом темп конвейера входит в модель в виде безразмерного параметра:

$$\beta = T_K / \bar{T}. \quad (4)$$

При моделировании используются следующие допущения:

1. Время цикла формовочного автомата считается случайной величиной, распределенной по нормальному закону распределения с математическим ожиданием  $\mu = \bar{T}$  и среднеквадратическим отклонением  $\sigma$ . Таким образом, говоря языком теории массового обслуживания, формовочный комплекс формирует нормальный поток заявок на обслуживание. Выбор нормального закона распределения опосредован тем, что действительно многие параметры реальных технических систем, в том числе и время операций, имеют разброс, близкий к нормальному [2]. Это является следствием центральной предельной теоремы и того факта, что различные факторы, вызывающие нестабильность времени цикла сами по себе являются случайными величинами, и не один из них не вносит решающего вклада. В реальных условиях значения  $\mu$  и  $\sigma$  определяются на основании данных хронометража. Зная параметры распределения можно определить коэффициент стабильности для времени цикла:

$$\psi = \frac{\sigma}{\mu} \cdot 100\%. \quad (5)$$

Здесь нужно сделать важную оговорку. Мы не рассматриваем подробно, какие операции и в какой последовательности выполняются внутри формовочного комплекса. Вообще говоря, при некоторых схемах компоновки и алгоритмах работы могут реализовываться другие законы распределения, и эти случаи нужно изучать отдельно.

2. Время между приходом тележек на позицию формовки является детерминированной постоянной величиной, определяемой только скоростью конвейера. Вообще

говоря, это не так, потому что это время тоже подвержено разбросу. Однако стабильность скорости обычно настолько высока, что в первом приближении мы можем принять ее постоянной.

3. Между формовочным комплексом и конвейером отсутствуют какие-либо накопители, то есть изготовление очередной формы не может начаться, пока предыдущая форма не выставлена на конвейер.

Таким образом, с точки зрения теории массового обслуживания [3], мы имеем дело с одноканальной системой массового обслуживания с ожиданием, имеющей нормальный поток заявок на обслуживание и постоянное время обслуживания, определяемое скоростью конвейера. Длина очереди ограничена одной заявкой.

Конечной целью моделирования является определение оптимального значения коэффициента  $\beta$ , при котором будет достигнута максимальная эффективность системы. Моделирование проводилось методом Монте-Карло на имитационной модели, реализованной в программной среде *Wolfram Mathematica*. Для каждого значения  $\beta$ , лежащего в диапазоне от 0,05 до 1,5 с шагом 0,05 проводилось по 10 000 вычислительных экспериментов, в каждом из которых в соответствии с принятым законом распределения выбиралось случайное значение времени цикла формовочного комплекса. После обработки полученного массива данных вычислялся коэффициент производительности интегрированной системы  $h$ .

Исследование проводилось при следующих исходных данных: производительность формовочного комплекса  $\Pi = 180$  форм/ч (что соответствует  $\mu = 20$  с); среднеквадратическое отклонение времени цикла  $\sigma = 1$  с. Таким образом, коэффициент стабильности, определяемый по формуле (5), в рассматриваемом случае составил 5 %. Результаты исследования представлены на рис. 2.

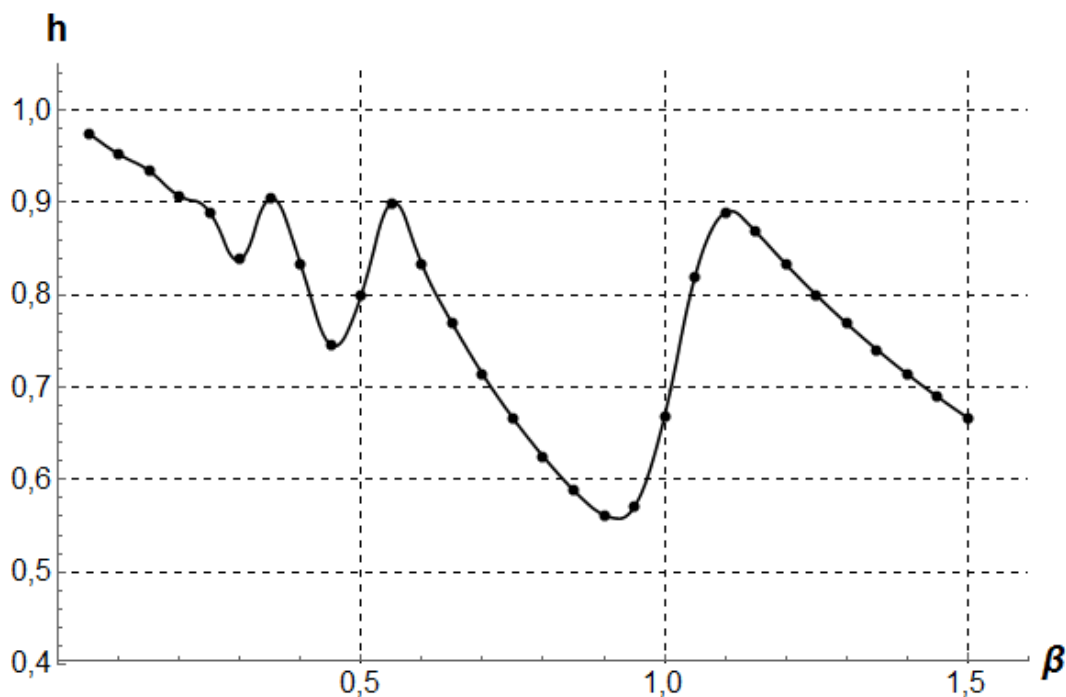


Рис. 2 – Зависимость коэффициента производительности от приведенной скорости конвейера

Видно, что полученная кривая имеет несколько пиков. При этом нужно учитывать, что меньшие значения коэффициента  $\beta$  соответствуют большей скорости конвейера, что будет соответствовать большему проценту пропуска тележек на позиции формовки. Поэтому наиболее оптимальным видится значение  $\beta = 1,1$ , при котором коэффициент производительности достигает 0,9. Подобная кривая была получена в свое время А. П. Куприяновым для указанных исходных данных.

Тем не менее, из данных вычислительного эксперимента можно получить более наглядную кривую. Дело в том, что график на рис. 2 оценивает эффективность только с точки зрения производительности. Однако есть еще и такой показатель, как доля тележек конвейера, заполненных формами. Как можно видеть из рис. 2, он не влияет напрямую на производительность системы в целом: в некоторых случаях, коэффициент производительности даже выше 0,9. Однако понятно, что занятость конвейера также является показателем эффективности процесса, поскольку пропуски тележек не самым лучшим образом влияют как на загрузку самого конвейера, так и на работу последующих участков, в первую очередь участка заливки. Для обеспечения ритмичности работы всей линии необходимо стремиться к тому, чтобы минимизировать пропуски тележек на участке формовки.

На рис. 3 показана зависимость доли занятых тележек конвейера  $q$  от коэффициента  $\beta$ , полученная по данным проведенного ранее вычислительного эксперимента.

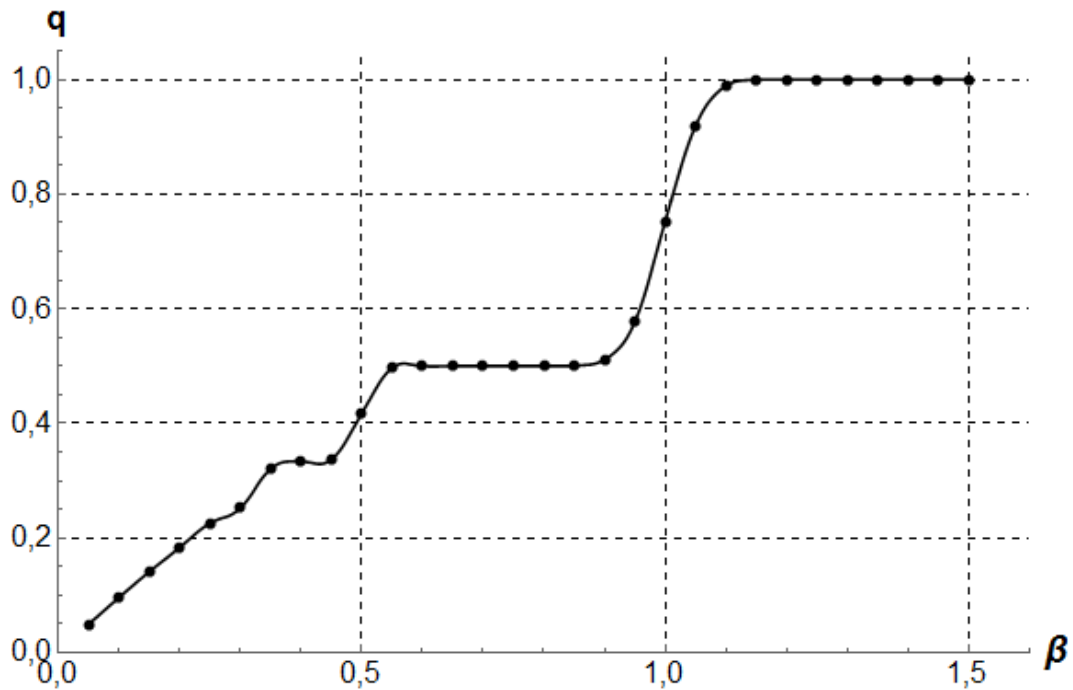


Рис. 3 – Процент занятых тележек конвейера в зависимости от приведенной скорости

Можно объединить эти два показателя эффективности, введя обобщенный коэффициент эффективности интегрированной системы  $m$ , вычисляемый как их произведение. Зависимость этого показателя от коэффициента  $\beta$  приведена на рис. 4. Данная зависимость уже более наглядно демонстрирует оптимальные значения приведенной скорости конвейера.

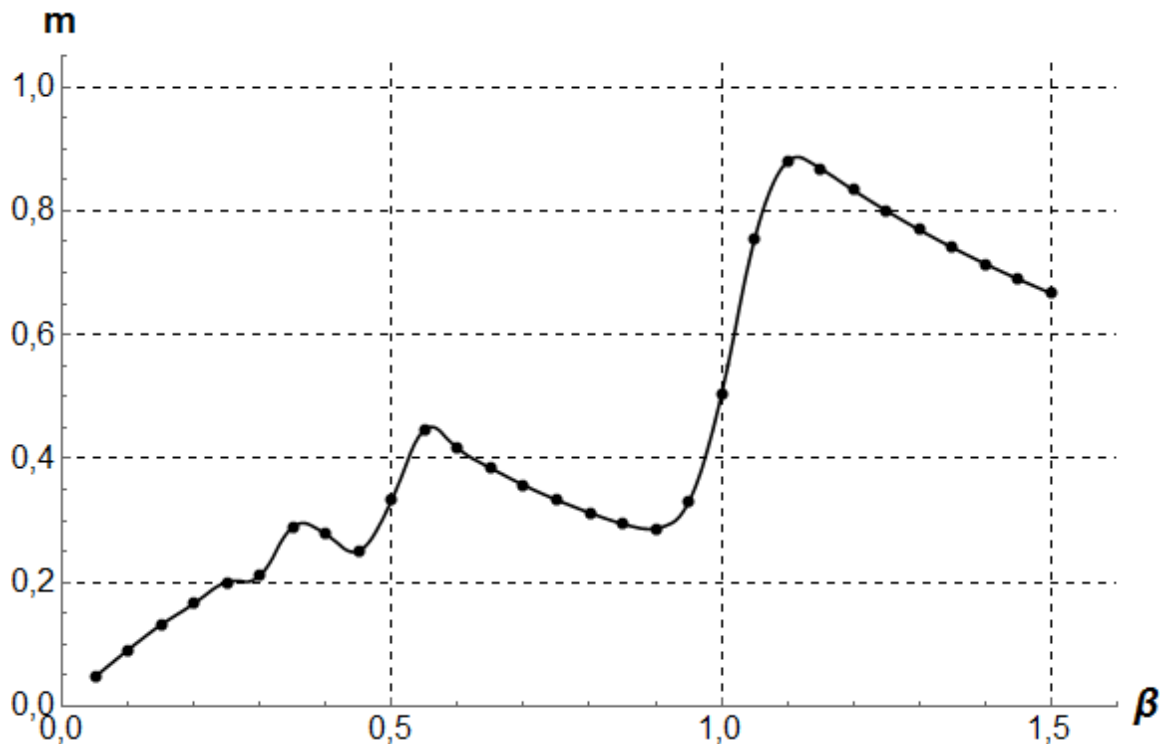


Рис. 4 – Зависимость обобщенного коэффициента эффективности интегрированной системы от приведенной скорости конвейера

Нужно учитывать, что полученные кривые справедливы для тех исходных данных, которые были приняты в расчете. Главным из них является коэффициент стабильности  $\psi$ . Дальнейшее моделирование с использованием приведенной методики показало, что при уменьшении  $\psi$  (что равносильно уменьшению разброса по времени цикла) оптимальное значения приведенной скорости конвейера стремится к 1, чего и следовало ожидать. При  $\psi = 0$ , когда продолжительность каждого цикла является строго определенной величиной, оптимальная скорость конвейера определяется классическим соотношением (1), а обобщенный коэффициент эффективности достигает максимально возможного значения. Наоборот, при увеличении нестабильности, оптимальное значение  $\beta$  сдвигается в большую сторону, а обобщенная эффективность уменьшается. Так, при  $\psi = 20\%$   $\beta_{opt} = 1,3$ , а  $m_{max} \approx 0,7$ . При этом зависимость обобщенной эффективности все больше вырождается в монотонную кривую без экстремумов.

Таким образом, используя приведенную методику оценки можно определить оптимальные значения приведенной скорости конвейера для каждого конкретного случая. Важное преимущество данной методики заключается в том, что использование именно нормального закона распределения продолжительности цикла не является принципиальным. Здесь мы использовали его лишь в качестве примера и как наиболее распространенный статистический закон. Вообще же, для проведения вычислительного эксперимента и формирования массива данных может использоваться любой доступный закон распределения, в том числе и эмпирический, полученный непосредственно на основе хронометража.

#### Список литературы:

1. Введение в математическое моделирование: Учеб. пособие / В.Н. Ашихмин [и др.]; под ред. П.В. Трусова. – М.: Университетская книга, Логос, 2007. – 440 с.
2. Шмид, Д. Управляющие системы и автоматика. Пер. с нем. / Д. Шмид, А. Бауман, Х. Кауфман, Б. Зиппель. – М.: Техносфера, 2007. – 584 с.
3. Дворецкий, С.И. Моделирование систем: учебник для студ. высш. учеб. заведений / С.И. Дворецкий, Ю.Л. Муромцев, В.А. Погонин, А.Г. Схиртладзе. – М.: Издательский центр «Академия», 2009. – 320 с.