

УДК: 004.942, 658.512.8, 658.512.4

Статистическое моделирование производственных процессов гибкой автоматизированной сборки в среде объектно-ориентированного программирования

Скворцова Д. А.

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана,
факультет «Инженерный бизнес и менеджмент»,
Россия, 105005, г. Москва, 2-ая Бауманская ул., д. 5

E-mail: skvortsova.da@bmstu.ru

*Получено 21 ноября 2014 г.,
после доработки 09 марта 2015 г.*

Разработана программа, которая позволяет имитировать работу конвейера гибкого автоматизированного цеха сборки персональных компьютеров (ПК), с применением современного объектно-ориентированного языка программирования C#. Приведена диаграмма классов имитационной модели ГАЦ сборки ПК в режиме массового производства. Приводится анализ результатов моделирования.

Ключевые слова: имитационная модель гибкого автоматизированного цеха, статистическое моделирование производственных процессов

Statistical modeling of the production processes of the flexible automated assembly in the object-oriented programming environment

D. A. Skvortsova

Bauman Moscow State Technical University, Engineering Business and Management Faculty, 5, Baumanskaya 2-ya st., Moscow, 105005, Russia

Abstract. — Using modern object-oriented programming language C# a program for simulation of operation of the conveyor for flexible automated assembly of PC was developed. Class diagram of the simulation model of a flexible automated assembly line for PC assembly in mass production mode is presented. Simulation results analysis is presented.

Keywords: simulate model of the conveyor flexible automated assembly, statistical modeling of the production processes

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2015, vol. 7, no. 2, pp. 289–300 (Russian).

Введение

В настоящее время для того, чтобы уверенно занимать ведущее положение на мировом рынке, экономика нашей страны должна быть ориентирована на развитие инновационных технологий, собственную разработку и производство наукоемкой высокотехнологичной продукции. Необходимо осваивать производство *сложно структурированных изделий* на основе унифицированных компонентов расширенного рыночного применения, основными характеристиками которых являются: стабильные качество и надежность; полная отработка на технологичность, минимизация используемых ресурсов при относительно низкой себестоимости. Следует учитывать постоянно увеличивающееся значение программных и информационных компонентов в составе продукции, установка которых является неотъемлемой частью технологических процессов (ТП) сборки продукции.

В работе [Базров, 2001] изложен системный подход в применении модульного принципа при проектировании изделия и организации производства. Раскрыты основы организации производства на принципах модульной технологии. Рассмотрены вопросы системной унификации и гибкости специализации производства.

Стандарты ГОСТ Р ИСО серии 9000 предполагают учет требований каждого потребителя на основе управления большим количеством используемых конфигураций при крупносерийном и массовом типах производства. Управление конфигурацией сложной многокомпонентной продукции должно вестись на основе электронных структур изделий (ЭСИ) согласно ГОСТ 2.053-2006 и стандартам CALS-технологий ГОСТ Р ИСО 10303-41, 42, 43, 44. При этом в компьютерное конфигурирование продукции и процессов должно входить также ЭСИ производственно-технологического типа.

Одним из примеров современного наукоемкого изделия является персональный IBM/PC — совместимый компьютер, структура которого и принципы сборки приведены в работе [Соломенцев, Митрофанов, 2003], основанный на компонентном построении продукции и предполагающий внедрение гибких производственных систем (ГПС). Количество теоретически возможных конфигураций ПК превышает 2×10^4 . Как объект производства ПК характеризуются короткими циклами определения потребной конфигурации и технологической подготовки производства при возрастающих требованиях к качеству и надежности.

В работе [Скворцов А. В., Скворцова Д. А., 2005] проводится анализ конструкции ПК с точки зрения организации массового производства и выявляются основные перспективные направления оптимизации конструкции и особенности технологического процесса изготовления ПК как объекта массового производства.

В связи с наличием большого числа возможных конфигураций (n) при технологическом проектировании должно разрабатываться i -индивидуальных маршрутов, которые входят в некий обобщенный маршрут M_o . Обобщенный маршрут состоит в общей сложности из перечня операций, соответствующего современному уровню развитию технологий в конкретной области. $M_i \cap M_o \neq \emptyset$, где M_i — непустое множество индивидуальных маршрутов, состоящих из операций обобщенного маршрута и индивидуальных операций, присущих этому конкретному маршруту. В зависимости от целевой функции оптимизации ТП важным критерием будет изменение мощности обобщенного маршрута, т. е. изменение числа элементов этого множества. Области пересечения множеств M_i при этом должны стремиться к экстремальным значениям:

$$\bigcap_{i=1}^k M_i \rightarrow \max, \bigcup_{i=1}^k M_i \rightarrow \min, \text{ где } k \text{ — число индивидуальных маршрутов.}$$

На сегодняшний день не существует разработанного единого математического аппарата организации, проектирования и моделирования гибких производственных процессов с использованием современных технических средств и применением различных оптимизационных алгоритмов, который бы позволил повысить эффективность работы проектных групп. Работа

в условиях переменного-поточного производства при случайном параметре потока заказов во времени и по объему содержит значительную статистическую неопределенность, что не позволяет известными аналитическими методами рассчитать параметры ГПС, определить ее структуру и количественный состав компьютеризированных рабочих мест, транспортных, складских и накопительных систем.

В работе [Скворцова Д. А., Скворцов А. В., 2006] изложены принципы и результаты проектирования ГПС автоматизированной сборки на примере сборки ПК. Рассмотрены типовые схемы компоновки подобных ГПС, структуры имитационных моделей для управления производством.

Описание модели

Нами разработана имитационная модель гибкого автоматизированного цеха (ГАЦ) сборки персональных компьютеров (ПК), работающего в режиме массового производства. Изготовление продукции ведется относительно небольшими партиями объемом от 20 до 100 единиц в режиме непрерывно функционирующего производства. Схема участка ГАЦ общей конвейерной сборки ПК приведена на рисунке 1. Он состоит из входного и выходного накопителей, программно управляемого конвейера с паллетами (1), рабочих мест автоматизированной сборки (2) в количестве M_{PM} . На входной накопитель емкостью N_{VN} подаются паллеты (3) со сборочным комплектом для экземпляра ПК заказанной конфигурации. Выходной накопитель емкостью N_{VN} служит для накопления готовой продукции. В свою очередь, каждое рабочее место имеет собственные входной (4) и выходной (5) накопители емкостью n_{VP} и n_{WP} .

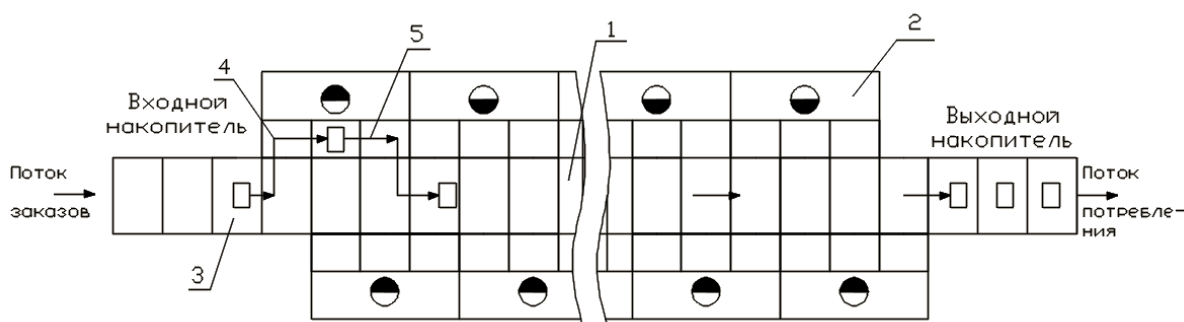


Рис. 1. Схема участка ГАЦ общей сборки ПК

Размер паллет определяется исходя из размеров продукции. Для сборки ПК подходит размер паллет $0,6 \times 0,6$ м.

Центральным объектом модели сборочного цеха является конвейер. Он может работать в двух режимах, чередуя их друг за другом. Первый режим — доставка компонентов из входного накопителя на рабочие места. Происходит это следующим образом: конвейер опрашивает входные накопители на каждом рабочем месте, если среди них есть пустые, он доставляет к ним необходимые компоненты (сборочные комплекты) в соответствии с поступившим заказом. После успешной доставки компонентов или в случае отсутствия необходимости их доставки, конвейер переключается в режим сбора собранных изделий из выходных накопителей рабочих мест и доставляет их в выходной накопитель сборочного цеха. Выгрузка компонентов происходит одновременно на все рабочие места сразу, так же одновременно происходит и загрузка собранных изделий с рабочих мест. Для обеспечения одновременности загрузки и выгрузки рабочие места с одной стороны конвейера смещены относительно рабочих мест, с другой стороны — на величину паллеты.

Разработана программа с применением современного объектно-ориентированного языка программирования C#, которая позволяет имитировать работу сборочного цеха. Диаграмма

классов, приведенная на рисунке 2, показывает выделенные классы и связи между ними с точки зрения наследования.

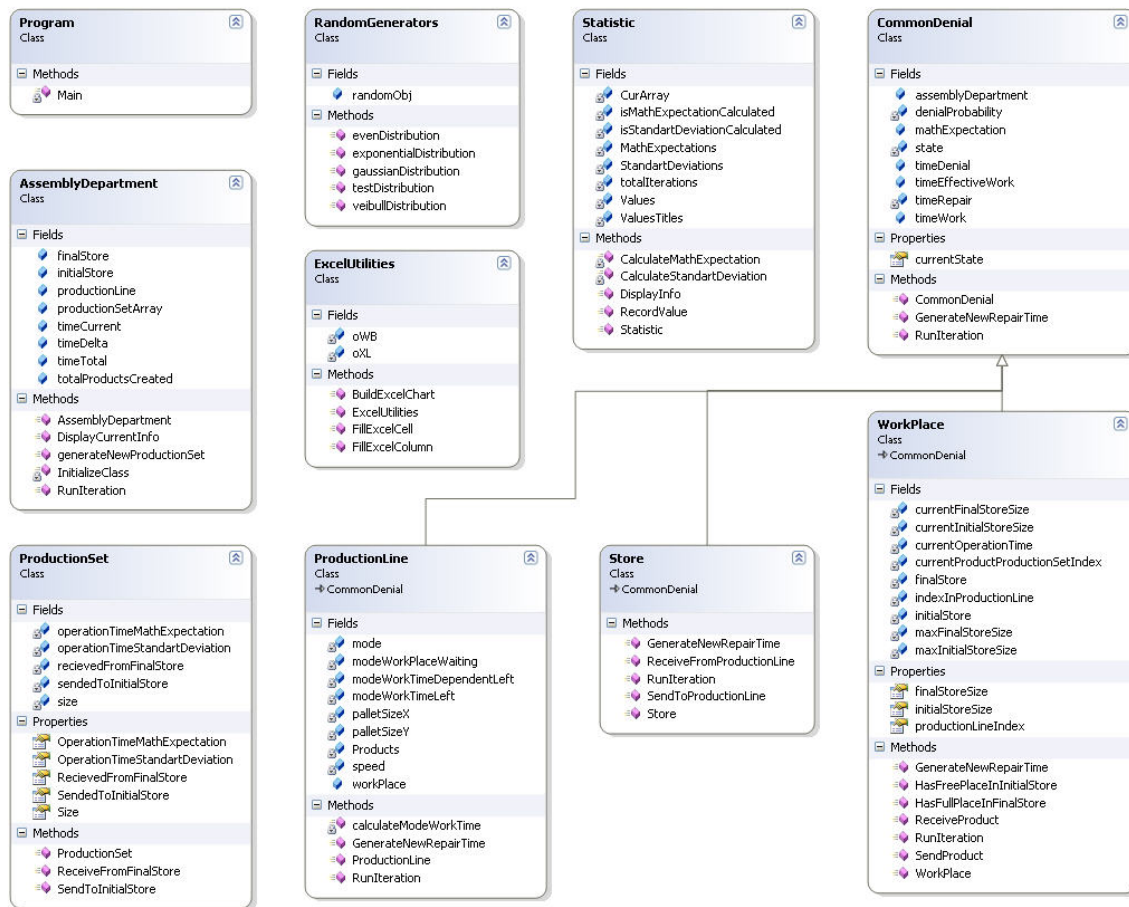


Рис. 2

Класс **Program** — класс, который содержит только один метод Main, с которого начинается работа приложения. Статистический класс **RandomGenerators** содержит набор методов для генерации случайных чисел в соответствии с различными законами распределения (равномерный закон распределения, закон Гаусса, закон Вейбулла и пр.). Класс **Statistic** — содержит свойства и методы для сбора и обработки статистической информации в процессе имитационного моделирования. Класс **AssemblyDepartment** — собственно модель сборочного цеха. Содержит ссылки на объекты: входной и выходной накопители, конвейер. Класс **CommonDenial** описывает общую логику обработки организационно-технического отказа. Данный класс наследует следующие классы: **ProductionLine**, **Store**, **WorkPlace**. Класс **Store** — класс, описывающий логику работы накопителя. Объекты входного и выходного накопителей, на которые имеется ссылка в классе **AssemblyDepartment**, оба являются экземплярами класса **Store**. Класс **ProductionLine** — модель конвейера. Содержит массив продуктов (собираемых изделий) и массив рабочих мест (объектов класса **WorkPlace**). Среди параметров имеет размеры паллет по оси OX и оси OY . Класс **WorkPlace** — модель рабочего места. Каждое рабочее место, расположенное вдоль конвейера, имеет порядковый номер, размер входного и выходного накопителей. Класс **ProductionSet** — класс, имитирующий заказы на изготовление производственных партий с разным временем операций. Класс **ExcelUtilities** содержит утилиты для построения графиков в MS Excel.

Имитационное моделирование работы сборочного цеха выполняется итерационно. У каждого из классов (**AssemblyDepartment**, **Store**, **ProductionLine**, **WorkPlace**), описывающих

основные элементы сборочного цеха, есть метод `RunIteration`, который задает логику выполнения одной итерации.

Время итерации для основного класса сборочного цеха `AssemblyDepartment` продолжается в течение времени, заданного в секундах в параметре `timeTotal`, а шаг изменения времени указан в секундах в параметре `timeDelta`. По умолчанию выбраны значения $\text{timeTotal} = 8 * 60 * 60 = 28800$ с (одна рабочая смена) и $\text{timeDelta} = 1$ с.

Работа программы начинается с создания экземпляра класса `AssemblyDepartment` и экземпляра класса `Statistic`. Во время создания экземпляра класса `AssemblyDepartment` обнуляются счетчики времени и количества собранных изделий, генерируется новая производственная партия, создаются объекты входного накопителя (`initialStore`), выходного накопителя (`finalStore`) и конвейера (`productionLine`). Во время инициализации объекта конвейера создается заданное количество рабочих мест.

После инициализации запускается цикл итераций для экземпляра класса `AssemblyDepartment` посредством вызова метода `RunIteration`. В рассматриваемом примере моделируется 250 итераций, т. е. один год работы сборочного цеха (при условии работы в одну 8-часовую смену, что задается в переменной `timeTotal`). После каждой итерации в экземпляре класса `Statistic` записываются измеряемые параметры остальных объектов модели.

Метод `RunIteration` класса `AssemblyDepartment` представляет собой цикл от нуля до времени, указанного в `timeTotal`, с шагом `timeDelta`. Внутри цикла происходит последовательный вызов метода `RunIteration` для объектов `initialStore`, `finalStore` и `productionLine`.

В процессе статистического моделирования можно изменять значения параметров, приведенных в таблице 1. В соответствии с указанными переменными параметрами можно выделить несколько различных комплексов испытаний.

Таблица 1. Переменные параметры модели

Объект моделирования	Наименование параметра	Единица измерения
Конвейер	Количество рабочих мест	шт.
	Скорость конвейера	м/с
	Размер паллеты x	м
	Размер паллеты y	м
	Вероятность отказа	[0; 1]
	Закон распределения и параметры к закону	
Рабочее место	Вероятность отказа	[0; 1]
	Емкость входного накопителя	шт.
	Емкость выходного накопителя	шт.
	Закон распределения и параметры к закону	
Накопитель	Вероятность отказа	[0; 1]
	Закон распределения и параметры к закону	
Партия деталей	МО (Mx) для генерации размера партии	шт.
	СКО (σx) для генерации размера партии	шт.
	МО (Mx) для генерации математического ожидания времени операции	с
	СКО (σx) для генерации математического ожидания времени операции	с
	МО (Mx) для генерации стандартного отклонения времени операции	с
	СКО (σx) для генерации стандартного отклонения времени операции	с
Время	Шаг моделирования	с
	Смена	с
	Период моделирования	раб. дней

Для примера проведем два комплекса испытаний, в которых переменным параметром будет количество рабочих мест. В первом случае испытания будут проводиться при безотказной работе всех объектов, а во втором случае проведем моделирование при отказе рабочих мест по закону Вейбула и вероятности отказа 0.00001. Такое значение вероятности означает, что приблизительно каждые 10000 с (примерно 2.7 часа) программа генерирует отказ рабочего места, МО времени простоя которого, в соответствии с заданными параметрами, равно 1800 с (0.5 часа). В реальной ситуации это будет равноценно периодическим простоям, связанным с уходом рабочего. Значения параметров приведены в таблице 2.

Таблица 2. Значения параметров моделирования для комплексов испытаний

Объект моделирования	Наименование параметра	Значения
Конвейер	Размер паллеты x	0.5 м
	Размер паллеты y	0.5 м
	Вероятность отказа	0
Рабочее место	Вероятность отказа	0.00001
	Емкость входного накопителя	1 шт.
	Емкость выходного накопителя	1 шт.
	З-н распределения и параметры к закону	Вейбул, $M = 30 \cdot 60$; $b = 1$
Накопитель	Вероятность отказа	0
Партия деталей	Mx для генерации размера партии	50 шт.
	σx для генерации размера партии	25 шт.
	Mx для генерации МО времени операции	5 * 60 с
	σx для генерации МО времени операции	1 * 60 с
	Mx для генерации СКО времени операции	1 * 60 с
	σx для генерации СКО времени операции	0.5 * 60 с
Время	Шаг моделирования	1 с, 10 с
	Смена	8*60*60 с
	Период моделирования	250 раб. дней

Необходимо определить оптимальные сочетания параметров программы выпуска, скорости конвейера при максимальной загрузке рабочих мест. Разработанная программа позволяет проводить анализ выходных данных по графикам, автоматически создаваемых в MS Excel.

Результат моделирования

В результате моделирования, проведенного для безотказной работы (рис. 3а, 3б, 3в) и при отказе рабочих мест (рис. 4а, 4б, 4в), были построены три типа графиков: зависимость количества рабочих мест от значений МО количества вырабатываемых изделий (рис. 3а, 4а); зависимость количества рабочих мест от значений СКО количества вырабатываемых деталей (рис. 3б, 4б); зависимость количества рабочих мест от количества деталей, вырабатываемых одним рабочим (рис. 3в, 4в). Моделирование проводилось для скорости конвейера, равной 0.2 м/с, 0.5 м/с, 0.7 м/с с шагом моделирования 1 с и с шагом моделирования 10 с. Шаг моделирования влияет на точность результатов в среднем $\pm 6\%$.

На графике (рис. 3а, 4а) видно, что для различной скорости конвейера есть своя средняя предельная выработка деталей в смену:

- для скорости конвейера, равной 0.2 м/с, предельная выработка составит 2200 изделий в смену при безотказной работе и 2020 изделий при работе с отказами;
- для скорости, равной 0.5 м/с, предельная выработка составит 5600 изделий в смену при безотказной работе и 5050 изделий при работе с отказами;
- для скорости, равной 0.7 м/с, предельная выработка составит 7750 изделий в смену при безотказной работе и 7170 изделий при работе с отказами.

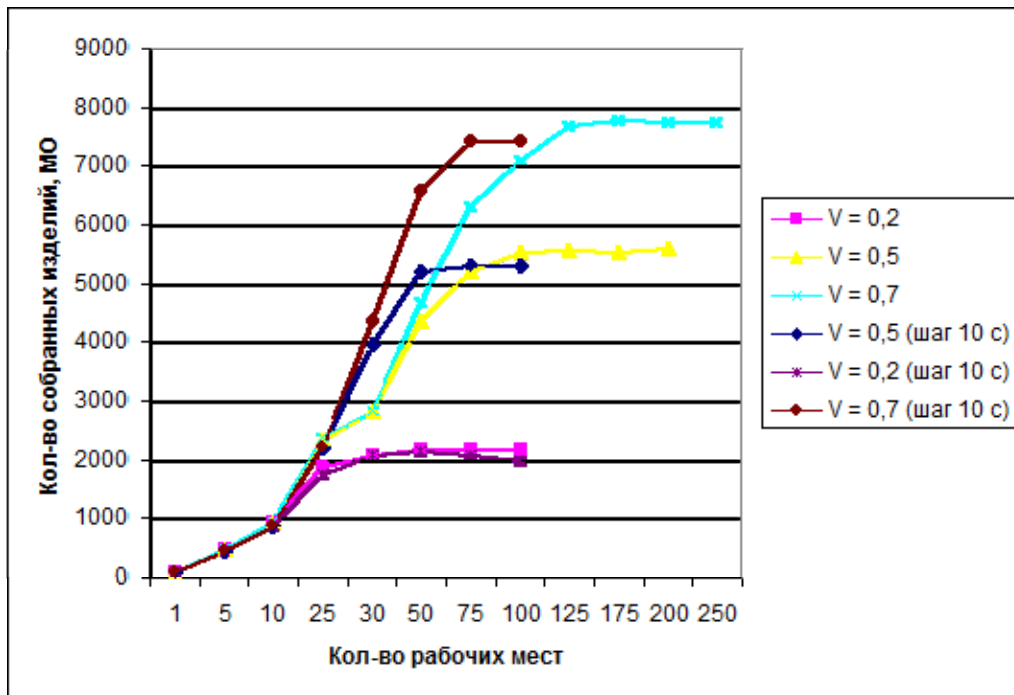


Рис. 3а

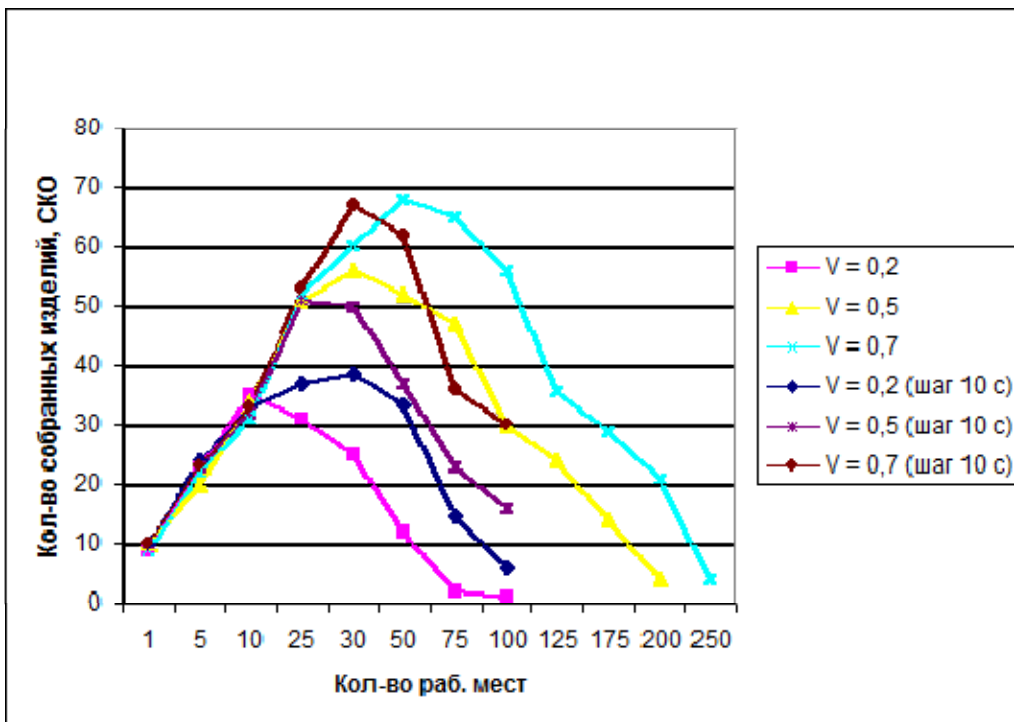


Рис. 3б

Эти значения важны при выборе скорости конвейера для обеспечения заданной программы выпуска. Также очевидно, что при достижении предельного значения выработки дальнейшее увеличение числа рабочих мест не рационально, т. к. ведет к увеличению затрат и снижению эффективности работы, т. е. один рабочий за смену вырабатывает меньше, увеличиваются простои оборудования.

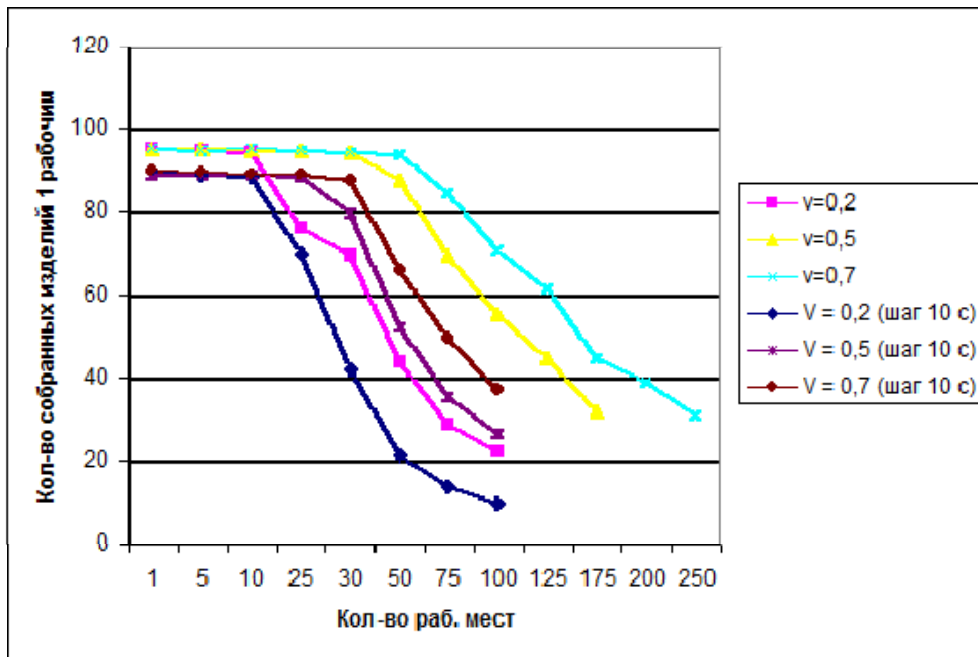


Рис. 3б

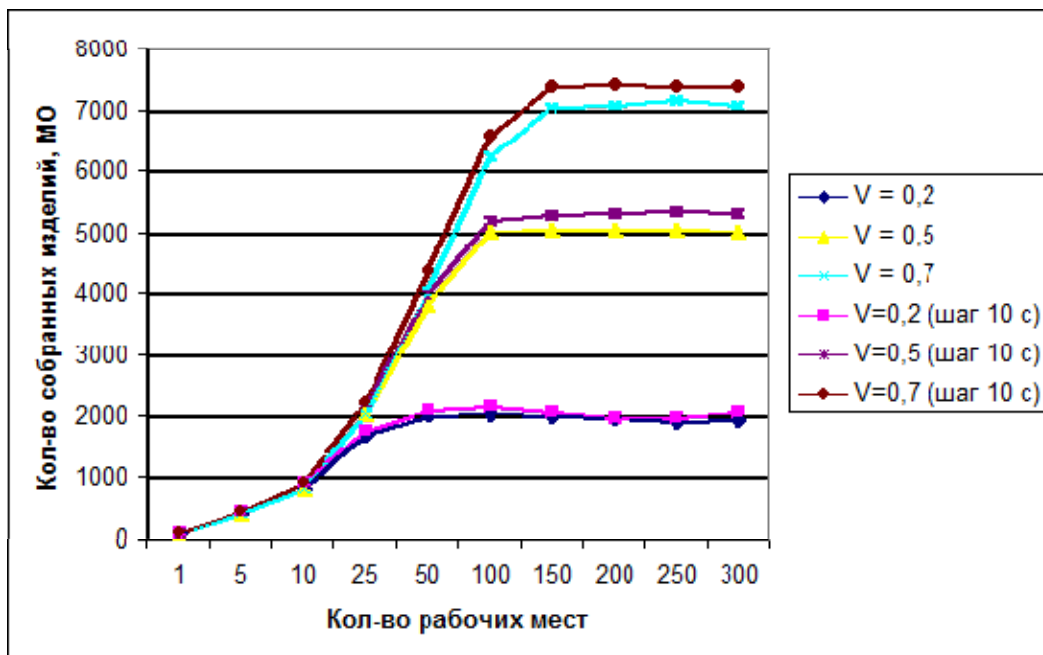


Рис. 4а

Значения СКО количества вырабатываемых деталей при различном числе рабочих мест говорят о равномерности/неравномерности загрузки линии (рис. 3б, 4б). Чем меньше СКО, тем равномернее загружена линия. В пределе СКО стремится к 1. Неравномерность загрузки линии не превышает 1–2 %, т. е. при безотказной работе:

- при скорости конвейера 0.2 м/с и сменной выработке 2200 изделий пик значений СКО составляет от 20 до 40 изделий для рабочих мест от 5 до 50;
- при скорости конвейера 0.5 м/с и сменной выработке 5600 изделий пик значений СКО составляет от 40 до 55 изделий для рабочих мест от 25 до 75;

- при скорости конвейера 0.7 м/с и сменной выработке 7750 изделий пик значений СКО составляет от 50 до 70 изделий для рабочих мест от 25 до 100.

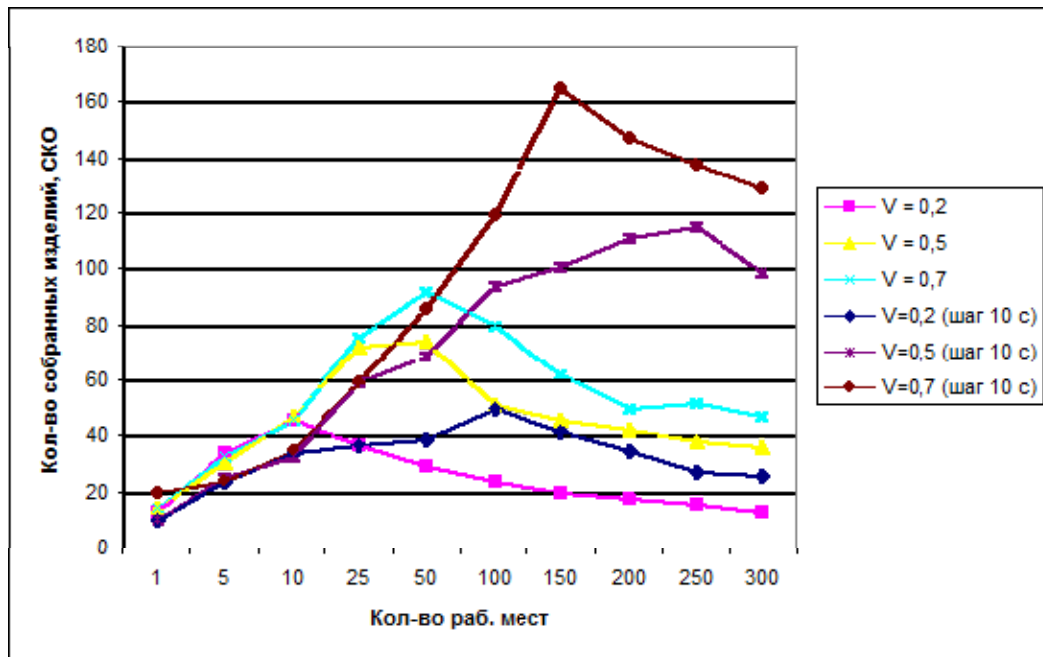


Рис. 4б

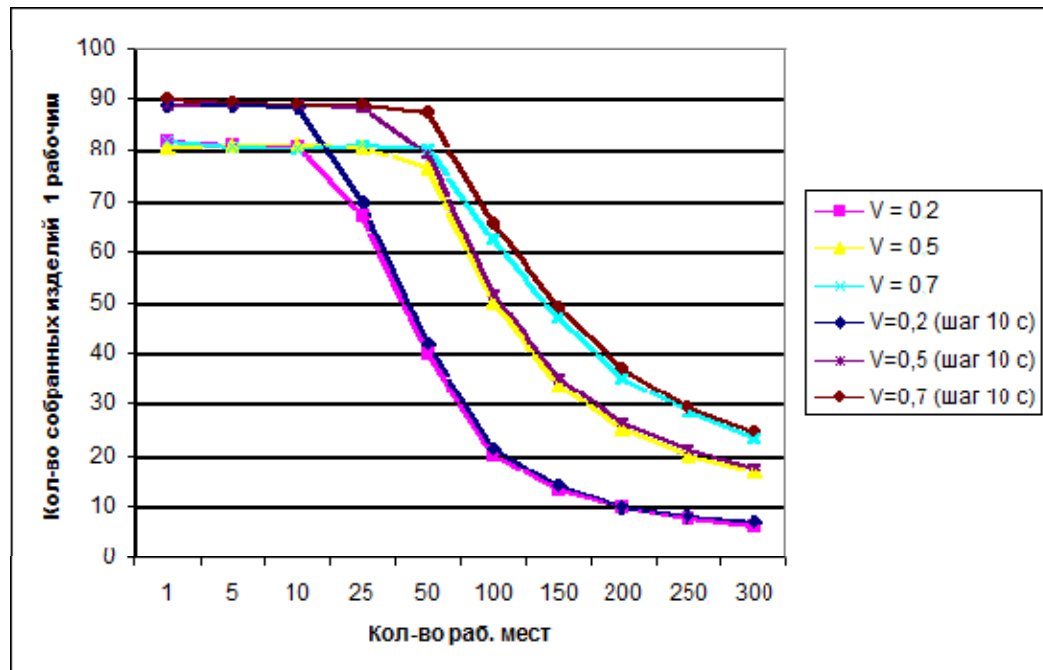


Рис. 4в

При работе с отказами неравномерность не превышает 3 %:

- при скорости конвейера 0.2 м/с и сменной выработке 2020 изделий пик значений СКО составляет от 20 до 50 изделий для рабочих мест от 5 до 150;
- при скорости конвейера 0.5 м/с и сменной выработке 5050 изделий пик значений СКО составляет от 40 до 90 изделий для рабочих мест от 10 до 200;

- при скорости конвейера 0.7 м/с и сменной выработке 7750 изделий пик значений СКО составляет от 50 до 165 изделий для рабочих мест ≥ 25 .

Отличие графиков СКО при безотказной работе и работе с отказами (рис. 3б, 4б) объясняется тем, что отказы оборудования вносят дополнительную нестабильность в работу линии и обеспечить равномерную загрузку можно только увеличением числа рабочих мест. При работе с отказами СКО стремится к единице после 150 рабочих мест, а при безотказной работе — после 75 рабочих мест.

Важным критерием выбора параметров производственной системы является эффективность работы и время простоя оборудования и рабочих. На эти взаимосвязанные параметры влияет количество собранных изделий одним рабочим (N_i , где i — номер рабочего). В идеале каждый рабочий должен собирать изделия непрерывно-последовательно, без простоев и отказов, т. е.

$$N_i = \frac{\Pi}{T_{\text{смена}}},$$

где Π — программа выпуска; $T_{\text{смена}}$ — время смены.

Однако результат моделирования показывает, что из-за неравномерности потока заказа программа выпуска изделий колеблется.

Как видно из графиков на рисунках 3в, 4в, при увеличении числа рабочих мест количество собранных изделий одним рабочим за смену резко снижается, что, в свою очередь, ведет к простоям оборудования и в целом к снижению эффективности работы. Максимально количество собранных изделий для безотказной работы составляет 95 изделий при шаге моделирования 1 с и 90 изделий при шаге моделирования 10 с, а при работе с отказами 90 изделий при шаге моделирования 1 с и 80 изделий при шаге моделирования 10 с. При этом для обоих вариантов работы линии при скорости конвейера 0.2 м/с снижение наблюдается после 25 рабочих мест; при скорости конвейера 0.5 м/с и 0.7 м/с снижение наблюдается после 50 рабочих мест. При работе с отказами максимальное количество собранных изделий составляет 90 изделий при шаге моделирования 1 с и 80 изделий при шаге моделирования 10 с.

Для более точного определения необходимого и достаточного числа рабочих мест для установленной программы выпуска при различных скоростях конвейера учитывается сочетание значений суммарного количества собранных изделий за смену и количества собранных изделий одним рабочим. Оба этих параметра в идеале должны стремиться к максимуму.

Если рассмотреть экстремальные сочетания параметров, то станет очевидно, что необходим поиск компромиссного решения при выборе производственных параметров или необходимо вводить дополнительное экономическое обоснование. Например, для безотказной работы и скорости конвейера 0.2 м/с 2200 изделий в смену могут выработать 100 рабочих, но при этом каждый из них будет собирать 22 изделия, т. е. эффективность рабочего снизится на 77 %. Если выбрать максимальное количество изделий, собранных одним рабочим, для этого же случая это составит 95 изделий, то за смену будет выработано всего 1040 изделий, эффективность производства снизится на 53 %.

Для безотказной работы и скорости конвейера 0.2 м/с при 25 рабочих местах один рабочий будет собирать 75 изделий на линии, снижая свою эффективность на 20 %, а за смену будет собрано 1900 изделий, что составит 86 % от максимального значения. Или при 30 рабочих местах один рабочий будет собирать 70 изделий на линии, снижая свою эффективность на 26 %, а за смену при этом будет собрано 2100 изделий, что составит 95 % от максимального значения.

Для безотказной работы и скорости конвейера 0.5 м/с сочетания экстремальных значений будут следующие: 175 рабочих могут обеспечить максимальную выработку изделий, составляющую 5600 штук в смену, или 25 рабочих могут собрать по 95 изделий каждый, т. е. суммарно обеспечивая лишь 2375 штук в смену. Таким образом, при максимальной программе выпуска загрузка одного рабочего будет на 36 %, а при максимальной загрузке одного рабочего программа выпуска составит 42 % от максимально возможного.

Оптимальными сочетаниями параметров для данной скорости конвейера (0.5 м/с) будет:

- 75 рабочих с загрузкой каждого 70 изделиями в смену и программой выпуска 5250 изделий, при этом простои будут составлять 26 % рабочего времени, но программа выпуска будет составлять 94 % от экстремального значения;
- второй вариант представляет собой сочетание следующих значений параметров: 50 рабочих, загруженных на 93 % и выпускающих 88 изделий в смену, таким образом обеспечивая суммарный выпуск 4400 изделий, что составляет 79 % от максимально возможного значения.

Сочетание экстремальных значений параметров для случая безотказной работы и скорости конвейера 0.7 м/с будет следующим: 7750 изделий в смену могут обеспечить 175 рабочих, при этом каждый из них будет собирать 44 изделия, что составит 46 %-ную загрузку; 30 рабочих могут собирать каждый 95 изделий за смену, обеспечивая выпуск, равный 2850 изделиям — 37 % от максимума. Более рациональным решением будет сочетание загрузки 75 % времени (71 изделие в смену каждым) 100 рабочих при выполнении 92 % максимальной выработки (всего 7100 изделий) или загрузки на 88 % времени (84 изделия, собранных 1 рабочим) и суммарным выпуском 6300 изделий (81 % от максимального значения).

Аналогичные результаты анализа для работы с отказами приведены в таблице 3.

Таблица 3. Анализ результатов моделирования для работы с отказами

Скорость конвейера		Суммарное количество собранных изделий		Количество собранных изделий одним рабочим	
		шт.	% от максимального значения	шт.	% от максимального значения
0.2 м/с	Экстремальное сочетание для максимальной программы выпуска	2020	100 %	20	76 %
	Экстремальное сочетание для максимальной загруженности рабочего	810	40 %	81	100 %
	Оптимальное сочетание	1680	83 %	67	83 %
0.5 м/с	Экстремальное сочетание для максимальной программы выпуска	5050	100 %	25	31 %
	Экстремальное сочетание для максимальной загруженности рабочего	2025	40 %	81	100 %
	Оптимальное сочетание	5020	99 %	50	62 %
	Оптимальное сочетание	3820	76 %	76	94 %
0.7 м/с	Экстремальное сочетание для максимальной программы выпуска	7050	100 %	47	58 %
	Экстремальное сочетание для максимальной загруженности рабочего	4020	57 %	81	100 %
	Оптимальное сочетание	6260	89 %	63	78 %

Как видно из анализа результатов моделирования, для более однозначного и обоснованного выбора решения по организации производства необходимо использовать экономические параметры.

Разработанная программа позволяет, изменяя параметры производственной системы, проводить различные комплексы испытаний и подбирать оптимальные параметры в зависимости от решаемой задачи, возникающей при проектировании и разработке гибких автоматизированных рабочих участков, цехов, линий, использующих конвейеры. Выведение результатов в виде графиков и таблиц значений в Excel позволяет проводить анализ и уточнять результаты моделирования.

Несмотря на то что на сегодняшний день существует множество профессионального программного обеспечения, программных продуктов, при помощи которых можно проводить раз-

личное моделирование, все они имеют различные недостатки для решения той задачи, которая рассматривается в статье. Часть существующего программного обеспечения, такого как, например, AnyLogic, MathWorks Simulink, — дорогое для решения разовых задач моделирования при проектировании производства. Другие, например Scilab или Maxima — бесплатная альтернатива продуктов MatLab, позволяют решать задачи оптимизации и симуляции, но не имитационного моделирования. Представленная в этой статье программа может применяться для моделирования гибких произведенных процессов, а также при решении задачи организации систем массового обслуживания при их проектировании. Данные, полученные при моделировании, использовались при разработке технологической части завода по сборке персональных компьютеров в г. Обнинске. В результате были подобраны оптимальные сочетания параметров для различных программ выпуска, технологических процессов и конвейерного оборудования.

Список литературы

- Базров Б. М.* Модульная технология в машиностроении. — М.: Машиностроение 2001. — 380 с.
ГОСТ Р ИСО 10303-41–2000. Системы автоматизации производства и их интеграция. Представление данных об изделии и обмен этими данными. Часть 41. Интегрированные обобщенные ресурсы. Основы описания и поддержки изделий.
- ГОСТ Р ИСО 10303-42–2000. Системы автоматизации производства и их интеграция. Представление данных об изделии и обмен этими данными. Часть 43. Интегрированные обобщенные ресурсы. Геометрическое и топологическое представление.
- ГОСТ Р ИСО 10303-44–2000. Системы автоматизации производства и их интеграция. Представление данных об изделии и обмен этими данными. Часть 44. Интегрированные обобщенные ресурсы. Конфигурация структуры изделия.
- Скворцов А. В., Скворцова Д. А.* Конструкторско-технологические аспекты массового производства компьютеров // Сборка в машиностроении и приборостроении. — 2005. — № 2.
- Скворцова Д. А., Скворцов А. В.* Принципы создания гибких производственных систем автоматизированной сборки // Проблемы машиностроения и надежности машин. — 2006. — № 1. — С. 52–59.
- Соломенцев Ю. М., Митрофанов В. Г., Павлов В. В., Рыбаков А. В.* Информационно-вычислительные системы в машиностроении. CALS-технологии. — М.: Наука, 2003. — 292 с.