

# МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-4-91-100

\*Дуюн И.А., Чуев К.В.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

\*E-mail: duyun77@mail.ru

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ГИБКИХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ И РОБОТИЗИРОВАННЫХ КОМПЛЕКСОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

**Аннотация.** В статье представлена методика прогнозирования и анализа эффективности использования гибких производственных систем и роботизированных комплексов. В качестве инструментов анализа применены имитационное моделирование и теория массового обслуживания. Производственная программа выпуска изделий, имеющая определенную номенклатуру и объемы выпуска, представлена потоком заявок. Производственный процесс моделируется во времени и прогнозируются различные технологические ситуации. Вычислительный эксперимент проводился на базе разработанной программы с применением парадигмы объектно-ориентированного программирования на языке Python. Реализована вероятностная модель зависимости показателей качества работы линии от производственной программы изготовления деталей. Варианты производственных программ представлены в виде комбинаций полей рассеивания этапов жизненного цикла: периодичности поступления деталей и времени обработки на станках. Периодичность поступления заготовок на линию обработки аппроксимирована экспоненциальным законом, время выполнения механической обработки на станках – законом нормального распределения. Выполнен ряд серий вычислительных экспериментов и проанализированы их результаты, характеризующие стабильность работы линии через значения показателей качества: сменной загрузки станков, загрузки накопителя деталей, вероятности его переполнения. Выявлены основные закономерности, обеспечивающие высокие показатели сменной загрузки оборудования, а также факторы, приводящие к их снижению.

**Ключевые слова:** бережливое производство, гибкие производственные системы (ГПС), роботизированные комплексы, имитационное моделирование, теория массового обслуживания, показатели эффективности.

**Введение.** Основной тенденцией развития современного производства является широкое применение гибких производственных систем и роботизированных комплексов. Это связано с необходимостью обеспечения высокой эффективности производства за счет повышения производительности и качества выпускаемой продукции, применения технологий, снижающих влияние человека на производственный процесс [1–3]. Внедрение высокотехнологичного и высокопроизводительного оборудования связано, как правило, с необходимостью дополнительных капитальных затрат на приобретение оборудования и реорганизацию производства и должно быть экономически обосновано. Использование более производительного оборудования повышает объем выпускаемой продукции и, следовательно, снижает ее себестоимость за счет изменения соотношения прямых производственных затрат к единице продукции. Однако, при этом данное оборудование за счет своей высокой стоимости повышает фондоемкость производства, и в некоторых случаях может оказаться экономически

нецелесообразным. Критерием эффективности модернизации производства является обеспечение определенных значений ряда технико-экономических показателей, таких как себестоимость единицы продукции, фондоемкость, коэффициент загрузки оборудования. Экономия прямых издержек в расчете на единицу продукции должна превышать исходные капитальные вложения. В связи с этим решение вопросов расчета и прогнозирования технико-экономических показателей эффективности производства в различных условиях его организационной структуры, в том числе с использованием математического моделирования, является важной научной и практической задачей [4–17].

**Методология.** Одним из важных показателей экономической эффективности производства, в том числе в условиях его модернизации и применения гибких производственных систем и робототехнических комплексов, является коэффициент загрузки оборудования. Данный показатель должен иметь значение не ниже порогового,

в противном случае дорогостоящее оборудование будет иметь большой срок окупаемости, а производство высокую фондоемкость. Особенно остро вопрос обеспечения приемлемых значений коэффициента загрузки оборудования стоит в условиях многономенклатурного мелкосерийного производства [18, 19]. Данный тип производства широко распространен и составляет около 60–70 % производства в целом.

Для прогнозирования и анализа данного показателя в условиях различных структурных формирований производства предлагается использовать инструменты имитационного моделирования и теории массового обслуживания. Под имитационным моделированием в данном случае понимается вычислительный эксперимент, позволяющий имитировать во времени реальный производственный процесс, прогнозировать различные технологические ситуации, отображать вероятность появления позитивных и негативных проявлений в зависимости от вектора входных параметров. Математический аппарат теории массового обслуживания применен для анализа потока заявок [20], под которым понимается производственная программа выпуска изделий, имеющая определенную номенклатуру и объемы выпуска.

**Основная часть.** Имитационное моделирование проводилось для анализа эффективности мелкосерийного машиностроительного производства. В качестве анализируемой производственной структуры принята гибкая производственная система (ГПС) из четырех обрабатывающих центров, оснащенных роботами манипуляторами и накопителями деталей. Технологический цикл имеет параллельно-последовательную структуру: два центра имеют возможность обрабатывать поступающие детали последовательно, вторая пара центров работает параллельно. Таким образом, система включает две параллельные линии по два центра. ГПС предназначена для обработки разнообразных деталей в рамках производственной программы. Целью моделирования является выявление негативных производственных ситуаций, снижающих коэффициент загрузки оборудования, и определение технологических условий, обеспечивающих максимально полную загрузку обрабатывающих центров.

Для реализации вычислительного эксперимента на языке высокого уровня Python была разработана программа с применением концепции объектно-ориентированного программирования. Программа предполагает возможность моделирования детерминированных и случайных процессов. Детерминированный процесс оперирует

известными, однозначно определенными исходными данными: периодичность поступления деталей на первый станок, время обработки деталей на каждом из станков. Результатом моделирования является имитация технологического цикла в течение заданного времени, например, рабочей смены, с выбранным шагом. Детерминированный расчет приемлем для моделирования цикла обработки определенного типа изделия. Однако, больший интерес представляет моделирование случайных процессов. С этой целью в программу встроено генератор псевдослучайных чисел (ПСЧ), который формирует последовательности случайных чисел на основе трех методов: средних квадратов, иррационального числа и конгруэнтного. В соответствии с исходными условиями решаемой задачи последовательность ПСЧ может подчиняться закону нормального распределения или показательному закону. Для проверки соответствия полученной последовательности ПСЧ заданному закону распределения используются критерии согласия Колмогорова, Пирсона и корреляционный момент, предусмотрено также визуальное отображение в виде гистограммы. Сгенерированная последовательность независимых случайных величин используется для задания входных параметров (время поступления деталей, время обработки детали на первом и втором станках, время обработки дополнительных деталей) и имитирует производственную программу предприятия, содержащую определенную номенклатуру различных изделий, технологический маршрут изготовления которых имеет различное операционное время. Результаты вычислительного эксперимента представлены в виде протокола моделирования, отражающего состояние системы на каждом шаге модельного времени. Для удобства обработки результаты анализа протокола экспортируются в отдельный файл Excel и состоят из следующих величин: степеней загрузки станков линии, степени загрузки накопителя, вероятности переполнения накопителя, количества обработанных деталей.

**Результаты.** С применением разработанной программы, были проведены вычислительные эксперименты, направленные на выявление закономерностей изменения параметров качества исследуемой системы при задании различных входных условий. Использована вероятностная модель: производственная программа изготовления деталей (ППИД) представлена в виде совокупности полей рассеивания случайных величин, отображающих различные временные этапы жизненного цикла изделий. Периодичность поступления заготовок на линию обработки аппроксимиро-

вана экспоненциальным законом, время выполнения механической обработки на станках – законом нормального распределения. При проведении вычислительных экспериментов для получения адекватных результатов использовалась статистически значимая выборка, то есть для каждого варианта производственной программы

проводилось не менее 50 вычислительных экспериментов. После проведения достаточного числа опытов моделирования, выполнялся анализ полученных результатов: вычислялись средние значения параметров качества, а также выполнялось графическое отображение результатов в виде гистограммы.

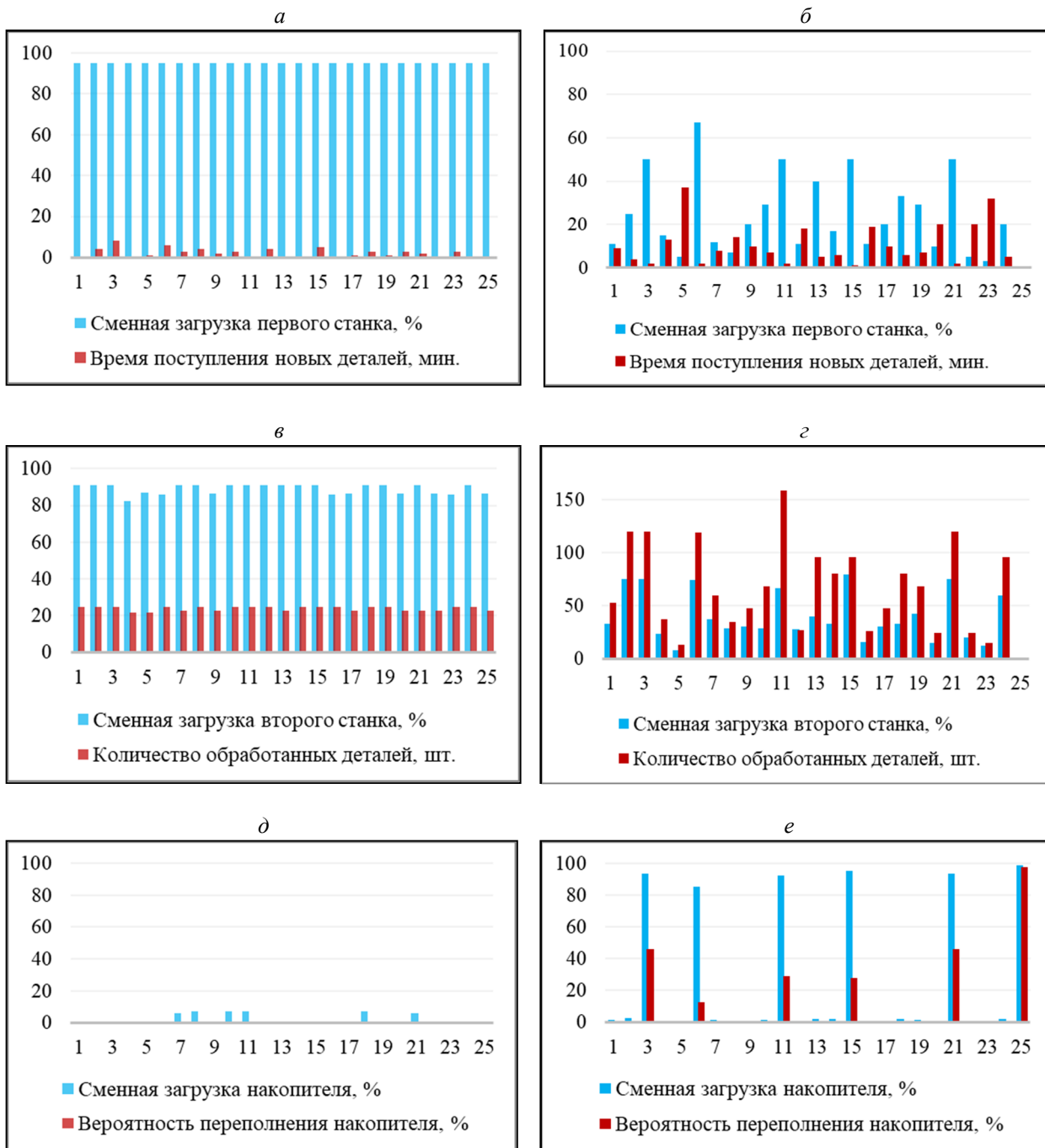


Рис. 1. Результаты моделирования (а, в, д – первый вариант ППИД; б, з, е – второй вариант ППИД): а, б – корреляционные сочетания сменной загрузки первого станка и периодичности поступления заявок; в, з – корреляционные сочетания количества обработанных деталей и сменной загрузки второго станка; д, е – корреляционные сочетания сменной загрузки накопителя и вероятности его переполнения

В ходе анализа результатов первых экспериментов были выявлены некоторые зависимости: загруженность первого станка определяется вре-

менем поступления новых деталей, загруженность второго станка напрямую влияет на количество обрабатываемых деталей, а степень загру-

женности накопителя коррелирует с вероятностью переполнения накопителя. В связи с этим было принято решение объединить описанные пары в гистограммы с группировкой с целью наглядного отображения существующих закономерностей. Описанные соотношения, а также другие зависимости параметров качества от входных условий, наиболее рационально проанализировать при рассмотрении двух предельных случаев: комплекс работает стабильно и имеет параметры качества, приближенные к идеальным (рис. 1, а, в, д), комплекс работает не стабильно и имеет неудовлетворительные параметры качества (рис. 1, б, з, е).

Необходимо отметить, что для упрощения визуальной оценки в гистограммы включены не все, а по 25 вычислительных экспериментов. Как видно, полученные соотношения действительно диаметрально противоположны. Интерес представляют причины возникновения этих ситуаций, которые заключаются в исходных условия моделирования, представленных на рис. 2. Для первого «идеального» случая центры группирования времени обработки на обоих станках одинаковы, а поля их рассеивания имеют узкий диапазон, при этом максимальное значение поля рассеивания периодичности поступления заготовок

меньше минимального значения поля рассеивания времени обработки детали первым станком. Вследствие этого комплекс работает стабильно и без простоев в течении выполнения всей производственной программы, о чем свидетельствуют высокие показатели сменной загрузки станков — 90-95 % (рис. 1, а, в). Во втором случае реализован ряд неблагоприятных условий: центр группирования поля рассеивания времени обработки на первом станке меньше центра группирования поля рассеивания времени обработки второго станка, поля рассеивания для обоих станков существенно шире, кроме того поле рассеивания периодичности поступления заготовок перекрывает поле рассеивания времени обработки деталей первым станком. Перечисленные факторы негативно влияют на результат и вносят некоторую хаотичность в работу комплекса: первый станок большую часть времени простаивает, его сменная загрузка в рамках производственной программы колеблется в диапазоне 5-50 % и только для одного наименования детали составляет 65 %, как следствие простаивает также второй станок, его средняя сменная загрузка составляет около 35 %, так как время работы станков не согласовано для большей части деталей производственной программы (рис. 1, б, з).

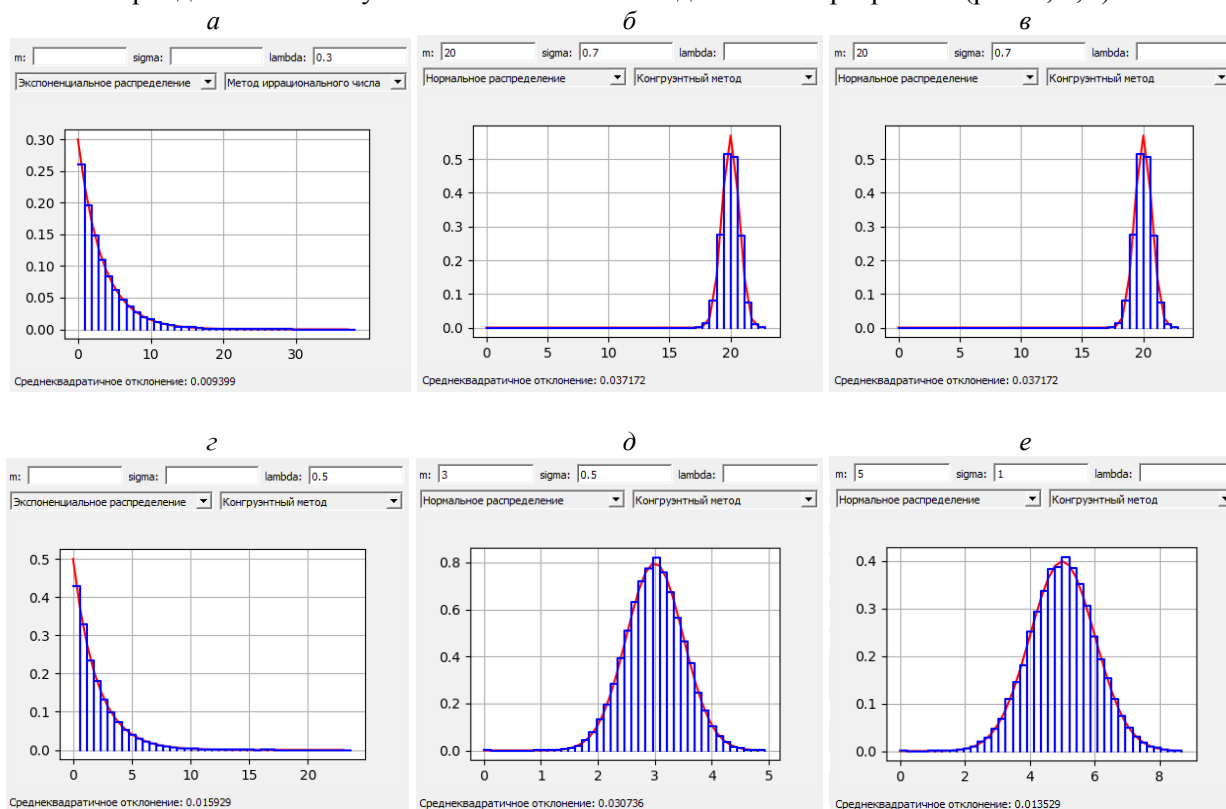


Рис. 2. Исходные данные моделирования: (а, б, в – первый вариант ППИД; г, д, е – второй вариант ППИД): а, г – поле рассеивания периодичности поступления заготовок на первый станок, мин; б, д – поле рассеивания времени обработки на первом станке, мин; в, е — поле рассеивания времени обработки на втором станке, мин

Несогласованность времени работы станков приводит также к высокой вероятности переполнения накопителя деталей, что недопустимо и требует увеличения его размера. В первом же случае накопитель практически свободен и можно свести его объем к минимуму, что сократит производственную площадь. Несомненно, в условиях реального производства редко встреча-

ются описанные выше крайние ситуации, поэтому для более полного анализа были проведены серии вычислительных экспериментов для других возможных сочетаний исходных данных с использованием представленной методики. Исходные данные вычислительных серий приведены в табл. 1, а полученные результаты моделирования – в табл. 2.

Таблица 1

## Исходные данные имитационного моделирования

№ серии вычисл. эксперимента	Периодичность поступления деталей, мин (характеристика экспоненциального закона)		Параметры времени обработки на станке №1, мин (характеристики нормального закона распределения)			Параметры времени обработки на станке №2, мин (характеристики нормального закона распределения)		
	$\lambda$	интервал, мин	$m$	$\sigma$	поле рассеивания, мин	$m$	$\sigma$	поле рассеивания, мин
1	0,1	[0; 60]	3	0,5	[1; 5]	5	1	[1,9]
2	0,8	[0; 10]	3	0,5	[1; 5]	5	1	[1,9]
3	0,3	[0; 20]	10	2	[2; 18]	15	2	[7,23]
4	0,2	[0; 40]	15	2	[7; 23]	20	2	[12,28]
5	0,5	[0; 15]	3	0,1	[2,5; 2,5]	5	0,5	[3,8]
6	0,8	[0; 10]	3	0,1	[2,5; 3,5]	5	0,5	[3,8]
7	0,3	[0; 20]	10	1	[6; 13]	15	1	[11;19]
8	0,2	[0; 40]	15	1	[11; 19]	20	1	[16,24]
9	0,3	[0; 20]	20	0,7	[17,5; 22,5]	20	0,7	[17,5; 22,5]
10	0,25	[0; 30]	20	1,2	[15; 25]	20	1,2	[15; 25]
11	0,2	[0; 40]	20	2,5	[10; 30]	20	2,5	[10; 30]
12	0,18	[0; 45]	20	4	[5; 35]	20	4	[5; 35]
13	0,3	[0; 20]	15	0,7	[12,5; 17,5]	25	0,7	[23,5; 27,5]
14	0,25	[0; 30]	15	1,2	[10; 20]	25	1,2	[20; 30]
15	0,2	[0; 40]	15	2,5	[5; 25]	25	2,5	[15; 35]
16	0,3	[0; 20]	25	0,7	[23,5; 27,5]	15	0,7	[12,5; 17,5]
17	0,25	[0; 30]	25	1,2	[20; 30]	15	1,2	[10; 20]
18	0,2	[0; 40]	25	2,5	[15; 35]	15	2,5	[5; 25]

Таблица 2

## Результаты имитационного моделирования показателей качества работы ГПС

№ серии вычисл. эксперимента	Степень загрузки накопителя, %	Вероятность переполнения накопителя, %	Степень загрузки станка №1, %	Степень загрузки станка №2, %	Сменная выработка деталей, шт.
1	26,63	9,65	28,70	44,31	76
2	82,18	18,69	57,32	74,49	120
3	54,54	4,73	86,68	88,92	36
4	31,77	0,32	91,74	90,03	25
5	79,71	20,23	49,46	71,38	107
6	90,41	18,68	55,28	75,71	115
7	59,47	3,78	87,16	91,01	35
8	34,38	0,20	90,36	91,09	25
9	1,50	0,00	95,00	88,90	24
10	2,77	0,00	94,98	87,27	24
11	7,18	0,01	94,58	78,35	23
12	9,12	0,25	94,50	77,76	23
13	57,95	2,09	93,00	93,02	20
14	53,69	2,55	88,62	89,31	19
15	44,92	3,92	90,64	91,99	21
16	0,40	0,00	96,00	51,07	19
17	0,38	0,00	92,16	47,30	18
18	0,40	0,00	95,86	47,73	19

Результаты содержат средние сменные показатели работы линии для условий выполнения различных вариантов производственных программ. Рассмотренные выше предельные варианты представлены под номерами серий №9 и №2.

В целом высокие значения коэффициентов загрузки станков (более 85%) наблюдаются при условии, когда центр группирования поля рассеивания времени работы первого станка меньше соответствующего параметра второго станка и обеспечена бесперебойность поступления заготовок (вычислительные серии №3-4, №7-8, №13-15). Однако в некоторых случаях может возникнуть вероятность переполнения накопителя и необходимо увеличивать его объем. Если центры группирования полей рассеивания времени работы станков одинаковы (серии №9-12), то вероятность переполнения накопителя равна нулю, а сменная загрузка также высока. При этом расширение поля рассеивания с 5 до 30 минут снижает среднюю сменную загрузку второго станка с

89 % до 78 %. Повышение времени периодичности поступления заготовок на линию значительно влияет на сменную загрузку станков и при перекрытии полей рассеивания существенно ее снижает (серии №1-2, №5-6). Неблагоприятным условием является также ситуация, когда центр группирования поля рассеивания времени работы первого станка больше соответствующего параметра второго станка (серии №16-18). В этом случае при бесперебойной поставке заготовок на первый станок его сменная загрузка остается высокой (более 90 %), однако сменная загрузка второго станка резко падает до 50 %. В такой ситуации рациональным решением является параллельная загрузка второго станка дополнительными деталями. В данном случае при условии, что второй станок свободен и не занят обработкой основных деталей, на него поступает дополнительная деталь, после обработки которой второй станок может снова вернуться к обработке основных деталей либо продолжить обработку дополнительных при отсутствии деталей в накопителе.

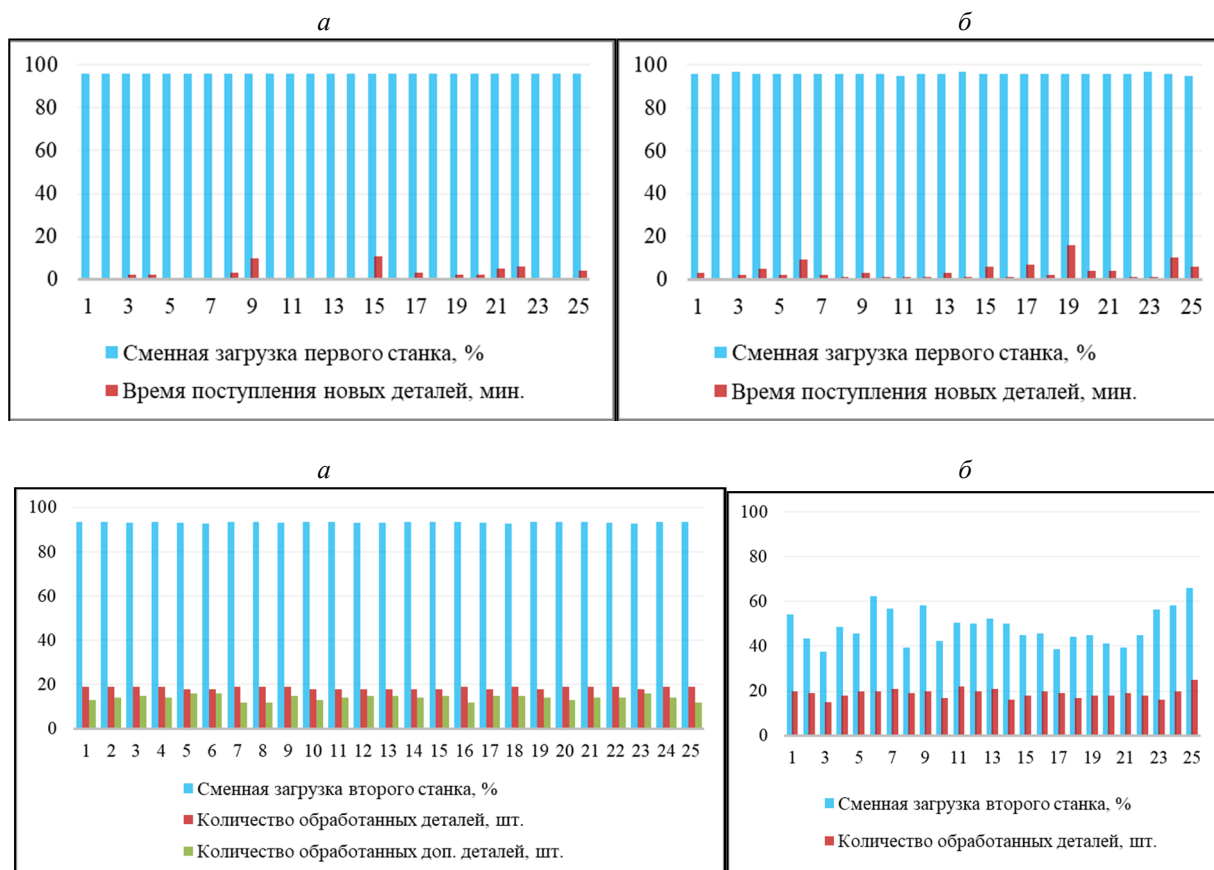


Рис. 3. Результаты моделирования вычислительной серии №18 (а, б – с загрузкой второго станка дополнительными деталями; б, г – без загрузки второго станка дополнительными деталями): а, б – корреляционные сочетания сменной загрузки первого станка и периодичности поступления заявок; в, г – корреляционные сочетания количества обработанных деталей и сменной загрузки второго станка

На рис. 3 представлен сравнительный анализ сменной загрузки станков по результатам вычислительной серии №18 с догрузкой второго станка дополнительными деталями. Использование дополнительных деталей для параллельной обработки на втором станке повышает сменную загрузку с 50 % до 90 %, но справедливо сделать уточнение, что количество обработанных основных деталей при параллельной загрузке второго станка не увеличится. Данный факт необходимо учитывать при планировании производства.

**Выводы.** Применение имитационного моделирования и теории массового обслуживания в задачах оценки и прогнозирования показателей эффективности работы ГПС и роботизированных комплексов, в частности коэффициента загрузки оборудования, показывает хорошие результаты и позволяет анализировать различные производственные ситуации, выявлять причины снижения технико-экономических показателей, определять организационные меры, направленные на снижение простоев оборудования и устранение потерь в жизненном цикле производства изделий. Так, наиболее благоприятными условиями функционирования линии, обеспечивающими стабильность работы и сменную загрузку оборудования свыше 90%, являются узкие поля рассеивания и близкие значения их центров группирования для времени обработки деталей на каждом из станков в пределах производственной программы. Расширение полей рассеивания снижает стабильность работы линии и сменную загрузку оборудования, так как повышает вероятность рассогласования синхронности работы станков. Самым неблагоприятным вариантом является существенное расхождение центров группирования полей рассеивания для отдельных станков и может вызвать серьезные производственные проблемы: переполнение накопителей деталей и простои оборудования. Представленная методика применима также в рамках концепции бережливого производства, так как направлена на выявление и устранение причин снижения эффективности использования оборудования.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Клочков В.В. Экономические проблемы создания центров специализации в отраслях машиностроения (на примере авиационной промышленности) // Актуальные проблемы экономики и управления на предприятиях машиностроения, нефтяной и газовой промышленности в условиях инновационно-ориентированной экономики. 2017. Т. 1. С. 87–97.
2. Рахлис Т.П. Экономическая оценка цифровой трансформации промышленного предприятия // Экономика и предпринимательство. 2019. № 12 (113). С. 1265–1270.
3. Тарасов И.В., Попов Н.А. Индустрия 4.0: трансформация производственных фабрик // Стратегические решения и риск-менеджмент. 2018. № 3 (106). С. 38–53.
4. Аблязов К.А., Аблязов Э.К. Использование информационных технологий для имитационного моделирования технологических операций погрузочно-разгрузочных работ на причалах морского порта // Эксплуатация морского транспорта. 2017. № 2 (83). С. 5–10.
5. Аверченков А.В., Колошкина И.Е., Шептунов С.А. Автоматизация нормирования операций производства изделий на оборудовании с ЧПУ // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2020. № 6. С. 57–67.
6. Васильев Л.В., Васильева Т.Н., Васильев В.И. Влияние информационных технологий на повышение качества и конкурентоспособности продукции // Известия Орловского государственного технического университета. Серия: Информационные системы и технологии. 2004. № 3 (4). С. 16–18.
7. Войтоловский Н.В., Купоров Ю.Ю., Лаврентьева О.О. Оценка организационных форм гибких производственных систем при использовании промышленной робототехники // Журнал правовых и экономических исследований. 2016. № 2. С. 122–127.
8. Лукьянец С.В., Снисаренко С.В., Лишай М.А. Имитационное моделирование четырех-прессовой линии штамповки деталей // Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. 2018. № 2 (112). С. 92–97.
9. Сердюк А.И., Рахматуллин Р.Р., Кузнецова Е.В. Использование метода циклограмм в предпроектных исследованиях гибких производственных систем // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. 2013. № 1 (3). С. 68–76.
10. Мальцева О.С. Моделирование организационно-технологических структур цехов и участков листовой штамповки // Вестник МГТУ Станкин. 2013. № 2 (25). С. 96–98.
11. Теперев А.С., Субботин С.А. Система мониторинга загрузки испытательного оборудования на предприятии // Трибуна ученого. 2019. № 10. С. 23–30.
12. Дуюн Т.А., Гринек А.В., Рубанов В.Г., Хуртасенко А.В. Математическое моделирование и оптимизация процессов механической об-

работки как средство управления технологическими параметрами на основе нечеткой логики // В сборнике: Региональная научно-техническая конференция по итогам конкурса ориентированных фундаментальных исследований по междисциплинарным темам, проводимого Российским фондом фундаментальных исследований и Правительством Белгородской области. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. 2017. С. 105–114.

13. Башарова А.А., Котельников М.А., Щенятский А.В. Обзор накопительных устройств и критериев их проектирования на примере участка токарно-револьверных станков с чпу ga-2600 и ga-2600/300 // Интеллектуальные системы в производстве. 2016. № 1 (28). С. 23–26.

14. Бешевли О.Б., Бушуев Д.А., Дуюн Т.А., Рубанов В.Г. Имитационное моделирование динамических характеристик модуля для обработки крупногабаритных подшипников скольжения // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2017. № 8. С. 149–156.

15. Зак Ю.А. Принципы построения систем имитационного моделирования производственных систем // Информационные технологии. 2018. Т. 24. № 11. С. 705–713.

16. Дуюн Т.А., Рубанов В.Г., Хуртасенко А.В., Гринек А.В., Кариков Е.Б., Лесунов М.Е. Математическое моделирование и оптимизация процессов механической обработки как средство управления технологическими параметрами на

основе нечеткой логики // В сборнике: Региональная научно-техническая конференция по итогам конкурса ориентированных фундаментальных исследований по междисциплинарным темам, проводимого Российским фондом фундаментальных исследований и Правительством Белгородской области. Белгородский государственный технологический университет им. В.В. Шухова. 2015. С. 138–156.

17. Дуюн Т.А., Гринек А.В., Сахаров Д.В. Моделирование и оптимизация технологических процессов изготовления изделий с использованием метода динамического программирования // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2013. № 3. С. 61–65.

18. Колесникова О.В., Лелюхин В.Е. Проблема составления оптимального расписания дискретного мелкосерийного производства // Фундаментальные исследования. 2015. № 2-11. С. 2340–2343.

19. Хаймович И.Н., Фролов М.А., Куралева Н.О. Совершенствование технологического процесса многономенклатурного производства на основе имитационного моделирования гибких производственных линий в цехе // Вестник Волжского университета им. В.Н. Татищева. 2016. Т. 2. № 3. С. 208–213.

20. Ушанев К.В. Имитационные модели системы массового обслуживания типа ра/m/1, h2/m/1 и исследование на их основе качества обслуживания трафика со сложной структурой // Системы управления, связи и безопасности. 2015. № 4. С. 217–251.

#### Информация об авторах

**Дуюн Иван Александрович**, студент кафедры технической кибернетики. E-mail: duyun77@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Чуев Кирилл Витальевич**, аспирант кафедры технологии машиностроения. E-mail: kirill.chuev@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 21.03.2021 г.

© Дуюн И.А., Чуев К.В., 2021

*\*Duyun I.A., Chuev K.V.*

*Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhova*

*\*E-mail: duyun77@mail.ru*

## ESTIMATION OF THE EFFICIENCY OF FLEXIBLE PRODUCTION SYSTEMS AND ROBOTIC COMPLEXES USING SIMULATION

**Abstract.** The article presents a methodology for forecasting and analyzing the effectiveness of the use of flexible production systems and robotic systems. Simulation modeling and queuing theory are used as analysis tools. The production program for the release of products, which has a certain nomenclature and production volumes, is represented by a flow of applications. The production process is modeled over time and various technological situations are predicted. The computational experiment is conducted on the basis of the devel-



oped program using the object-oriented programming paradigm in Python. A probabilistic model of the dependence of the quality indicators of the line on the production program for manufacturing parts is implemented. Variants of production programs are presented in the form of combinations of dispersion fields of stages of the life cycle: frequency of receipt of parts and processing time on machine tools. The frequency of receipt of workpieces on the processing line is approximated by an exponential law; the time of mechanical processing on machines is approximated by the law of normal distribution. A number of series of computational experiments have been carried out and their results have been analyzed, which characterize the stability of the line operation through the values of quality indicators: changeable loading of machine tools, loading of a parts accumulator, the probability of its overflow. The main regularities are revealed that provide high indicators of the shift loading of equipment, as well as the factors leading to their decrease.

**Keywords:** lean manufacturing, flexible manufacturing systems (FMS), robotic systems, simulation, queuing theory, performance indicators.

## REFERENCES

1. Klochkov V.V. Economic problems of centers of specialization establishment in machine-building industries (on example of aviation industry) [Ekonomicheskie problemy sozdaniya centrov specializatsii v otraslyah mashinostroeniya (na primere aviacionnoj promyshlennosti)]. Actual problems of economics and management at mechanical engineering enterprises, oil and gas industry in an innovation-oriented economy. 2017. Vol. 1. Pp. 87–97. (rus)
2. Rakhlis T.P. Economic assessment of digital transformation of an industrial enterprise [Ekonomicheskaya ocenka cifrovoj transformatsii promyshlennogo predpriyatiya]. Economics and Entrepreneurship. 2019. No. 12 (113). Pp. 1265–1270. (rus)
3. Tarasov I.V., Popov N.A. Industry 4.0: production factories transformation [Industriya 4.0: transformatsiya proizvodstvennykh fabrik]. Strategic decisions and risk management. 2018. No. 3 (106). Pp. 38–53. (rus)
4. Ablyazov K.A., Ablyazov E.K. Usage of information technology for a simulation technique of technological operations of loading-unloading works on the berths of the sea port [Ispol'zovanie informatsionnykh tekhnologiy dlya imitatsionnogo modelirovaniya tekhnologicheskikh operatsiy pogruzochnorazgruzochnykh rabot na prichalah morskogo porta]. Operation of sea transport. 2017. No. 2 (83). Pp. 5–10. (rus)
5. Averchenkov A.V., Koloshkina I.E., Sheptunov S.A. Automation of introduction of norms of working operations on cnc equipment [Avtomatizatsiya normirovaniya operatsiy proizvodstva izdelij na oborudovanii s CHPU]. Bulletin of the Ivanovo State Power Engineering University. 2020. No. 6. Pp. 57–67. (rus)
6. Vasiliev L.V., Vasilieva T.N., Vasiliev V.I. The impact of information technology on improving the quality and competitiveness of products [Vliyanie informatsionnykh tekhnologiy na povyshenie kachestva i konkurentosposobnosti produktsii]. Bulletin of the Oryol State Technical University. Series: Information systems and technologies. 2004. No. 3 (4). Pp. 16–18. (rus)
7. Voytlovskiy N., Kuporov J., Lavrentieva O. The assessment of flexible manufacturing systems organizational forms in industrial robotics environment [Vliyanie informatsionnykh tekhnologiy na povyshenie kachestva i konkurentosposobnosti produktsii]. Journal of Legal and Economic Research. 2016. No. 2. Pp. 122–127. (rus)
8. Lukyanets S.V., Snisarenko S.V., Lishay M.A. Simulation modeling of parts stamping line with four presses [Imitatsionnoe modelirovanie chetyrekhpressovoy linii shtampovki detalej]. Reports of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. 2018. No. 2 (112). Pp. 92–97. (rus)
9. Serdjuk A.I., Rahmatullin R.R., Kuznetsova E.V. The use of sequence diagrams in the prestudy flexible manufacturing systems [Ispol'zovanie metoda ciklogramm v predproektnykh issledovaniyakh gibkikh proizvodstvennykh sistem]. Mathematical and software systems in industrial and social spheres. 2013. No. 1 (3). Pp. 68–76. (rus)
10. Malceva O.S. Models of technical-organizational structures of sheet punching production units [Modelirovanie organizatsionno-tekhnologicheskikh struktur cekhov i uchastkov listovoy shtampovki]. Bulletin of MSTU Stankin. 2013. No. 2 (25). Pp. 96–98. (rus)
11. Teperev A.S., Subbotin S.A. Test equipment load monitoring system at the enterprise [Sistema monitoringa zagruzki ispytatel'nogo oborudovaniya na predpriyatii]. Scientist tribune. 2019. No. 10. Pp. 23–30. (rus)
12. Duyun T.A., Grinek A.V., Rubanov V.G., Hurtasenko A.V. Mathematical modeling and optimization of machining processes as a means of controlling technological means based on fuzzy logic [Matematicheskoe modelirovanie i optimizatsiya processov mekhanicheskoy obrabotki kak sredstvo upravleniya tekhnologicheskimi parametrami na osnove nechetkoj logiki]. In the collection: Regional scientific and technical conference on the results of the competition of oriented fundamental research on interdisciplinary topics, held by the Russian Foundation for Basic Research and the Government of the Belgorod Region. Belgorod State Technological

University named after V.V. Shukhov. 2015. Pp. 138–156. (rus)

13. Basharova A.A., Kotelnikov M.A., Shchenyatskiy A.V. Review of buffer units and their design criteria by the example of ga-2600 and ga-2600/300 nc turret lathe department [Obzor nakopitel'nyh ustroystv i kriteriev ih proektirovaniya na primere uchastka tokarno-revol'vernogo stankov s chpu ga-2600 i ga-2600/300]. Intelligent systems in production. 2016. No. 1 (28). Pp. 23–26. (rus)

14. Beshevli O.B., Bushuev D.A., Duyun T.A., Rubanov V.G. Simulation of the dynamic characteristics of a module for processing large-size plain bearings [Imitacionnoe modelirovanie dinamicheskikh harakteristik modulya dlya obrabotki krupnogabaritnykh podshipnikov skol'zheniya]. Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 2017. No. 8. Pp. 149–156. (rus)

15. Zak YU.A. Principles of building systems for simulation of production systems [Principy postroeniya sistem imitacionnogo modelirovaniya proizvodstvennykh sistem]. Information Technology. 2018. Vol. 24. No. 11. Pp. 705–713. (rus)

16. Duyun T.A., Rubanov V.G., Hurtasenko A.V., Grinek A.V., Karikov E.B., Lesunov M.E. Mathematical modeling and optimization of machining processes as a means of controlling technological parameters based on fuzzy logic [Matematicheskoe modelirovanie i optimizatsiya processov mekhanicheskoy obrabotki kak sredstvo upravleniya tekhnologicheskimi parametrami na osnove nechetkoj logiki]. In the collection: Regional scientific and technical conference following the results of the competition of oriented fundamental research on interdisciplinary

topics, held by the Russian Foundation for Basic Research and the Government of the Belgorod Region. Belgorod State Technological University named after V.V. Shukhov. 2015. Pp. 138–156. (rus)

17. Duyun T.A., Grinek A.V., Saharov D.V. Modeling and optimization of technological processes of manufacturing products using the method of dynamic programming [Modelirovanie i optimizatsiya tekhnologicheskikh processov izgotovleniya izdelij s ispol'zovaniem metoda dinamicheskogo programmirovaniya]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2013. No. 3. Pp. 61–65. (rus)

18. Kolesnikova O.V., Lelyukhin V.E. The problem of optimal scheduling of discrete small-scale production [Problema sostavleniya optimal'nogo raspisaniya diskretnogo melkoserijnogo proizvodstva]. Technical sciences. 2015. No. 2–11. Pp. 2340–2343. (rus)

19. Khaymovich I.N., Frolov M.A., Kuralesova N.O. Improving the process of multiproduct production-based simulation of flexible manufacturing line in the workshop [Sovershenstvovanie tekhnologicheskogo processa mnogonomenklaturnogo proizvodstva na osnove imitacionnogo modelirovaniya gibkikh proizvodstvennykh linij v cekhe]. Bulletin of the Volga University V.N. Tatishcheva. 2016. Vol. 2. No. 3. Pp. 208–213. (rus)

20. Ushanev K.V. Simulation models of queuing systems of type pa/m/1, h2/m/1 and research on the basis of their quality of service traffic with a complicated structure [Imitacionnye modeli sistemy massovogo obsluzhivaniya tipa pa/m/1, h2/m/1 i issledovanie na ih osnove kachestva obsluzhivaniya trafika so slozhnoj strukturoj]. Control, communication and security systems. 2015. No. 4. Pp. 217–251. (rus)

#### *Information about the authors*

**Duyun, Ivan A.** Student. E-mail: duyun77@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Chuev, Kirill V.** Postgraduate student. E-mail: kirill.chuev@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

---

*Received 21.03.2021*

#### **Для цитирования:**

Дуюн И.А., Чуев К.В. Оценка эффективности работы гибких производственных систем и роботизированных комплексов с использованием имитационного моделирования // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 4. С. 91–100. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-4-91-100

#### **For citation:**

Duyun I.A., Chuev K.V. Estimation of the efficiency of flexible production systems and robotic complexes using simulation. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. No. 4. Pp. 91–100. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-4-91-100