

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОПТИМИЗАЦИИ
АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ GPSS И ВНЕДРЕНИЕМ
РАННЕГО КОНТРОЛЯ ДЕФЕКТОВ**

Аннотация: В статье рассматривается применение имитационного моделирования на языке GPSS для оптимизации работы системы 3D-печати. Оценены различные сценарии работы с принтерами, включая управление очередями заказов и внедрение системы раннего обнаружения дефектов. Моделирование позволяет выявить основные проблемы, такие как потери заказов и перегрузка оборудования, и предложить решения для повышения эффективности системы. В частности, акцент сделан на сокращение времени ожидания и улучшение использования принтеров с помощью контроля качества на ранних этапах производства.

Ключевые слова: производственные процессы, имитационное моделирование, GPSS, 3D-печать, оптимизация, управление очередями, раннее обнаружение дефектов.

Frolikova Ekaterina Alekseevna, student 4 courses, modeling the process of optimizing additive manufacturing using gpss simulation modeling and early defect control.

Abstract: The article discusses the use of simulation modeling in GPSS to optimize the operation of a 3D printing system. Various scenarios for working with printers are evaluated, including order queue management and the

implementation of an early defect detection system. Simulation allows us to identify key problems, such as order losses and equipment overload, and propose solutions to improve system efficiency. In particular, the focus is on reducing waiting times and improving printer utilization through quality control in the early stages of production.

Keywords: production processes, simulation modeling, GPSS, 3D printing, optimization, queue management, early defect detection.

С развитием аддитивного производства значительно расширились возможности создания сложных конструкций с минимальными отходами. Однако одной из актуальных проблем остается высокий уровень брака, который существенно снижает производительность системы и увеличивает затраты времени и ресурсов. [1] Для решения этой проблемы были предложены различные методы контроля качества, в том числе внедрение системы раннего выявления дефектов. В этой статье рассматривается процесс оптимизации аддитивного производства с использованием имитационного моделирования в среде GPSS, а также анализ эффективности внедрения системы раннего контроля дефектов. Общая технология (методика) исследования бизнес-процессов на основе ИМ описана в [2, 3].

Для начала была разработана модель участка FDM-печати, где используются три 3D-принтера. В этой системе заказы поступают с случайными интервалами времени, а каждый заказ проходит через очередь на печать. Печать одной детали занимает случайное время, а в случае дефекта деталь возвращается на перепечатывание. В данной модели не предусматривался контроль качества на ранних этапах, что приводило к потере значительного числа заказов и увеличению нагрузки на систему.

В исходной модели, когда не предусматривалась система раннего контроля дефектов, 60% заказов не успевали быть обработаны. Среднее время ожидания в очереди составляло 122 минуты, а нагрузка на принтеры

была на пределе. Ресурсы использовались на максимуме, при этом большое количество заказов терялось из-за переполнения очереди. Из 511 поступивших заказов 307 были потеряны.

Характеристики очереди показывали, что принтеры были заняты в среднем 0,996 времени. Однако существенная проблема заключалась в высоком проценте брака, который только увеличивал время обработки заказов и нагрузку на оборудование.

На рисунке 1 представлен отчёт о симуляции системы без системы обнаружения дефектов.

LABEL	LOC	BLOCK TYPE	ENTRY COUNT	CURRENT COUNT	RETRY
ARRIVE	1	GENERATE	511	0	0
	2	MARK	511	0	0
ENTRYQ	3	QUEUE	1338	0	0
	4	TEST	1338	8	0
	5	ENTER	1023	1	0
	6	DEPART	1022	0	0
	7	ADVANCE	1022	2	0
	8	LEAVE	1020	0	0
	9	TRANSFER	1020	0	0
DEFECT	10	TRANSFER	827	0	0
GOOD	11	TABULATE	193	0	0
	12	TERMINATE	193	0	0
LOST	13	DEPART	307	0	0
	14	TABULATE	307	0	0
	15	TERMINATE	307	0	0

QUEUE	MAX CONT.	ENTRY	ENTRY(0)	AVE.CONT.	AVE.TIME	AVE.(-0)	RETRY
PRINTQ	10	9	1338	312	8.011	122.381	159.596

STORAGE	CAP.	REM.	MIN.	MAX.	ENTRIES	AVL.	AVE.C.	UTIL.	RETRY	DELAY
PRN	3	0	0	3	1023	1	2.988	0.996	0	8

Рисунок 1 – Отчёт о симуляции

В усовершенствованной модели была внедрена система раннего контроля дефектов, которая позволяла выявлять брак на первых стадиях печати. Процесс был разделен на две стадии: на первой, продолжительностью 20 ± 5 минут, 45% дефектов выявлялись сразу, а на второй стадии, продолжительностью 40 ± 10 минут, определялось еще 35% брака. Эта система позволила значительно снизить потери и повысить пропускную способность участка.

Результаты симуляции с системой раннего контроля дефектов показали заметное улучшение показателей. Количество потерянных заказов снизилось с 307 до 217, что увеличило долю обслуженных заказов с 38% до 54%. Время ожидания в очереди уменьшилось с 122 до 86 минут,

а средняя длина очереди снизилась с 8,0 до 7,6 заявок. Принтеры продолжали работать с высокой загрузкой, но их использование стало более эффективным за счет оптимизации работы с заказами.

Система раннего обнаружения дефектов показала свою высокую эффективность. Из 1440 запусков печати 751 заказ был выявлен как дефектный на ранней стадии, что позволило значительно сократить время обработки и перераспределить ресурсы.

На рисунке 2 представлен отчёт о симуляции системы без системы обнаружения дефектов

LABEL	LOC	BLOCK TYPE	ENTRY COUNT	CURRENT COUNT	RETRY					
ARRIVE	1	GENERATE	470	0	0					
	2	MARK	470	0	0					
	3	MARK	470	0	0					
ENTRYQ	4	QUEUE	1664	0	0					
	5	TEST	1664	6	0					
	6	ENTER	1441	1	0					
	7	DEPART	1440	0	0					
	8	ADVANCE	1440	2	0					
EARLY_DEFECT	9	TRANSFER	1438	0	0					
	10	MARK	751	0	0					
	11	LEAVE	751	0	0					
CONTINUE_PRINT	12	TABULATE	751	0	0					
	13	TABULATE	751	0	0					
	14	TRANSFER	751	0	0					
	15	ADVANCE	687	0	0					
LATE_DEFECT	16	TRANSFER	687	0	0					
	17	MARK	443	0	0					
GOOD	18	LEAVE	443	0	0					
	19	TABULATE	443	0	0					
	20	TABULATE	443	0	0					
	21	TRANSFER	443	0	0					
	22	MARK	244	0	0					
LOST	23	LEAVE	244	0	0					
	24	TABULATE	244	0	0					
	25	TABULATE	244	0	0					
	26	TERMINATE	244	0	0					
QUEUE	27	DEPART	217	0	0					
	28	TABULATE	217	0	0					
	29	TERMINATE	217	0	0					
	30	GENERATE	39	0	0					
	31	TERMINATE	39	0	0					
PRINTQ	10	7	1664	228	7.598	85.782	99.402	0		
PRN	3	0	0	3	1441	1	2.982	0.994	0	6

Рисунок 2 – Отчёт о симуляции

Внедрение системы раннего контроля дефектов существенно улучшает ключевые показатели эффективности аддитивного производства. Это позволяет повысить пропускную способность системы, снизить количество потерянных заказов и оптимизировать использование

производственных ресурсов. Моделирование в GPSS предоставило возможность оценить влияние различных сценариев на работу системы, а внедрение контроля на ранних этапах производства оказало значительное влияние на временные характеристики и эффективность работы принтеров. Внедрение таких систем может стать важным шагом к улучшению качества и сокращению времени производства в сфере аддитивных технологий.

Моделирование показало, что даже без увеличения количества оборудования, можно значительно улучшить производительность за счет оптимизации процессов и раннего контроля брака.

Источники:

1. Аддитивные технологии в России и в мире [Электронный ресурс] // Деловой профиль : официальный сайт. – 2023. – URL: <https://delprof.ru/press-center/open-analytics/additivnye-tekhnologii-v-rossii-i-v-mire/> (дата обращения: 12.12.2025).

2. Имитационное моделирование : лекционный материал [Электронный ресурс]. – URL: https://polyakov.imamod.ru/arc/stud/mmca/lecture_06.pdf (дата обращения: 12.12.2025).

3. Казакова М. Имитационное моделирование в GPSS [Электронный ресурс] // Habr : сайт. – URL: <https://habr.com/ru/articles/192044/> (дата обращения: 12.12.2025).