

УДК 004.942:658.7  
ББК 65.050  
JEL C02 C53

## Имитационное моделирование как метод оптимизации конвейерной системы

**Кулешов Максим Вадимович**, аспирант кафедры промышленной логистики,  
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия  
E-mail: [kuleshovmv@student.bmstu.ru](mailto:kuleshovmv@student.bmstu.ru)

**Захаров Михаил Николаевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедры  
«Детали машин», Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,  
Москва, Россия  
E-mail: [zmn@bmstu.ru](mailto:zmn@bmstu.ru)

**Аннотация:** На начальном этапе проектирования производственного цеха возникают ряд технико-экономических проблем. С помощью пакета GPSS World построена модель ленточного конвейера для имитации загрузки и разгрузки производственной линии. Модель отражает геометрические, кинематические и динамические характеристики конвейера. Грузы четырех типов различных по массе и размерам загружаются случайным образом. Разгрузка производится в конце конвейера или в промежуточных точках, в зависимости от типа груза. Для проверки модели, проведено испытание с одним типом грузом с движением через весь конвейер. Результаты экспериментов соответствуют расчетным данным и реальным показателям работы конвейера. Получена статистика по загрузке участкам конвейера и очередям перед загрузкой.

**Ключевые слова:** GPSS World, компьютерное моделирование, ленточный конвейер, имитация работы конвейера, промышленная логистика, поточное производство.

## Simulation as a method for optimizing a conveyor system

**Kuleshov Maxim Vadimovich**, Graduate student of the Department of Industrial Logistics, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

E-mail: [kuleshovmv@student.bmstu.ru](mailto:kuleshovmv@student.bmstu.ru)

**Zakharov Mikhail Nikolaevich**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Machine Parts Department, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

E-mail: [zmn@bmstu.ru](mailto:zmn@bmstu.ru)

**Abstract:** At the initial stage of designing a production workshop, a number of technical and economic problems arise. Using the GPSS World package, a belt conveyor model was built to simulate loading and unloading a production line. The model reflects the geometric, kinematic and dynamic characteristics of the conveyor. Loads of four types, different in weight and size, are loaded randomly. Unloading is carried out at the end of the conveyor or at intermediate points, depending on the type of cargo. To test the model, a test was carried out with one type of load with movement through the entire conveyor. The experimental results correspond to the calculated data and the actual performance of the conveyor. Received statistics on loading sections of the pipeline and queues before loading.

**Keywords:** GPSS World, simulation modeling, belt conveyor, conveyor belt imitation, industrial logistics, in-line production.

## Введение

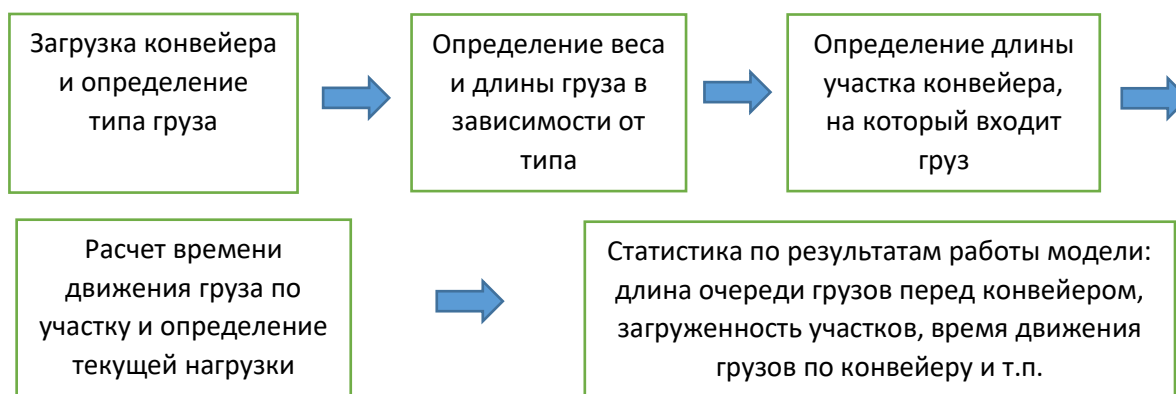
В современном мире многие предприятия не обходятся без конвейерной системы. Она используется в металлургии, для транспортировки сыпучих материалов, также для сортировки и распределения в пищевой промышленности, медицине и так далее. В большинстве случаев,

конвейер позволяет частично или полностью автоматизировать производство и сократить количество ручного труда. Однако, при использовании конвейерной системы в производстве с переменным спросом на продукцию, могут возникать трудности с поточной линией или складским помещением. В отдельные моменты времени, конвейер может быть перегружен или недогружен. Одной из проблем может быть скорость линии конвейера, т.к. при неоптимальных параметрах может возникать очередь перед загрузкой или скорость линии может быть недостаточной и в этом случае возникает дефицит на месте разгрузки. Изменения различных параметров конвейерной системы могут влиять на максимальную производительность, время изготовления продукции, на издержки предприятия и т.д. Все это влияет на экономику предприятия, т.к. зная максимальную производительность, можно прогнозировать, какой спрос производство может удовлетворить и в какой момент времени не будет хватать складских помещений или наоборот будет пустовать, особенно это заметно в условиях сезонного спроса. Эти и многие другие параметры логистики предприятия можно учесть с помощью имитационного моделирования, [1, С. 48]. Модель ленточного конвейера позволяет исследовать работу привода в течении смены или более длительного периода, в условиях близких к реальным.

### Материалы и методы

Для построения модели была использована Система Моделирования Общего Назначения (GPSS World = General purpose system simulation World), разработанная компанией Minuteman Software в 1993 году. С помощью GPSS World можно создавать модели, как в непрерывной среде, так и в дискретной. Модель может быть использована для проведения экспериментального исследования машины при различных сценариях [1, С. 91]. Эксперимент сопровождается статистической обработкой результатов. Моделирование дает возможность оценить конструкцию и работу системы до ее воплощения в цехе.

На рис. 1 представлена упрощенная блок-схема модели конвейера.



**Рис. 1. Блок-схема модели**

Для верификации модели, на конвейер загружался один груз, который проходил через 4 участка конвейера и разгружался в конце. Производительность загрузки постоянная 720 грузов / ч и груз размещался на ленте через равные интервалы. Шаг модельного времени 0.1с. Время моделирования 2880 единиц модельного времени или 4,8 минуты. Данные для эксперимента: вес груза – 12 кг; длина груза – 0,30 м; длины участков конвейера: 1 – 35 м., 2 – 20 м., 3 – 20 м., 4 – 20 м. Общая длина конвейера 95 м. Скорость ленты конвейера 0,9 м/с., безопасный зазор между грузами – 30 см.

Процесс моделирования запускался с помощью команды “Create Simulation” (рис. 2).

В первой части записано время начала и конца моделирования (0; 2880; start time, end time). Во второй части, статистика прохода грузов через очередь COLA: прошло 57 грузов (ENTRY) без задержки. В третьей части, статистика по загрузке участков конвейера: на 1-м

участке максимальная нагрузка 96 кг. На 2-м, 3-м, и 4-м участках по 60 кг. На всем конвейере максимальная нагрузка 264 кг. В четвертой части, статистика по времени движения грузов через конвейер: среднее время 1055.56 (105.556 с.). Стандартное отклонение равно 0, т.е. время движения всех грузов постоянное. Через конвейер прошло 36 грузов (Frequency), остальные (57-36=21 груз) остались на конвейере. В пятой части отчета приводятся исходные данные: продолжительность моделирования – 2880; производительность загрузки – 720; скорость конвейера – 9 (9см/0,1с. = 0,9 м/с.); зазор безопасности между грузами – 30 (см).

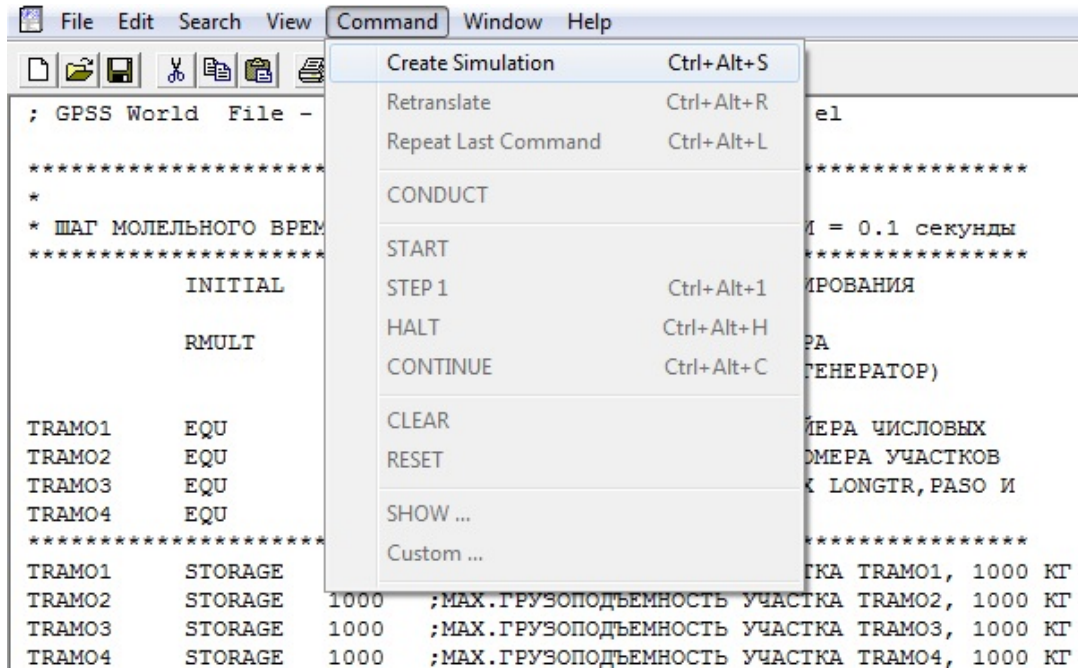


Рис. 2. Команда запуска с фрагментом программы

После прогона модели, GPSS World выводит отчет, который выглядит следующим образом (рис. 3):

	START TIME	END TIME	BLOCKS	FACILITIES	STORAGES					
	0.000	2880.000	31	1	5					
QUEUE	MAX CONT.	ENTRY	ENTRY(0)	AVE.CONT.	AVE.TIME	AVE. (-0)	RETRY			
COLA	1	0	57	57	0.000	0.000	0.000	0		
STORAGE	CAP.	REM.	MIN.	MAX.	ENTRIES	AVL.	AVE.C.	UTIL.	RETRY	DELAY
TRAMO1	1000	904	0	96	684	1	86.231	0.086	0	0
TRAMO2	1000	952	0	60	588	1	43.602	0.044	0	0
TRAMO3	1000	940	0	60	540	1	39.514	0.040	0	0
TRAMO4	1000	952	0	60	480	1	35.361	0.035	0	0
TRANSPR	2000	1748	0	264	684	1	204.708	0.102	0	0
TABLE	MEAN	STD.DEV.	RANGE		RETRY FREQUENCY		CUM. %			
TRANSITO	1055.556	0.000	1000.000	-	1125.000	0	36	100.00		
SAVEVALUE	RETRY	VALUE								
MODTIME	0	2880.000								
RENDMO	0	720.000								
VELOCID	0	9.000								
ESPACIO	0	30.000								

Рис. 3. Отчет после окончания моделирования



$$N \leq \frac{(l_i - l_{sp})}{a} + 1 \quad (3)$$

Шаг между грузами определяется производительностью загрузки  $Z$  и скоростью ленты конвейера  $v$ , [3, С. 126]:

$$a = \frac{3600 v}{Z} = \frac{3600 \cdot 0,9}{720} = 4,5 \text{ м}$$

Для участка 1, из (3) получим максимальное число грузов:

$$N \leq \frac{(l_i - l_{sp})}{a} + 1 \leq \frac{(35 - 0,3)}{4,5} + 1 = 8,711 \quad (4)$$

Ближайшее большее целое число из (4)  $N = 8 < 8,711$  дает результат, полученный выше из отчета, через максимальную массу, рис. 3. Таким образом, результаты моделирования согласуются с расчетными данными и реальными показателями работы конвейера.

В следующем эксперименте добавим следующие параметры. Пусть будет 4 типа груза, которые разгружаются в разных точках конвейера (табл. 2).

Таблица 2

**Участки конвейера и типы грузов**

№ участка	Длина участка, м	Зона разгрузки в конце участка	Тип разгружаемого груза	Тип проходящего груза
1	35	1	1	1, 2, 3, 4
2	20	2	2	2, 3, 4
3	20	3	3	3, 4
4	20	4	4	4

Увеличим производительность загрузки до 2000 грузов/ч, оставив скорость конвейера 0,9 м/с. Загрузка конвейера будет проходить случайным образом через разные промежутки времени. После прогона модели, GPSS World выводит отчет, который представлен на рис. 5.

Из отчета видно, что через конвейер прошло 171 грузов (ENTRY) и только 77 прошли без очереди (ENTRY (0)), максимальное число грузов в очереди составило 5. Среднее время очереди составило 0,78 секунды. Также из данного отчета видно насколько процентов был загружен участок конвейера (UTIL.), например, 1-ый на 42%. Видна статистика по количеству прошедших грузов через каждый участок. Всего сошло с конвейера 121 груз, 50 остались на конвейере в момент остановки модели.

### **Заключение**

Используя данную модель можно прогнозировать загрузку линии в пиковые отрезки времени, что делает проще планировать промышленную логистику предприятия т.к. компании, которые выпускают «сезонную» продукцию сталкиваются с проблемой перегруженности линии или простою производства. Эти проблемы могут приводить к перебоям поступления продукции на склад, следовательно, к конечному потребителю. Можно говорить и о нарушениях сроках поставки, тогда в следствии этого на предприятие будут накладываться штрафные санкции. Программа поможет быстро и точнее определить, сколько продукции предприятие может выпустить за определенный отрезок времени. В дальнейшем, используя компьютерную модель, будет проектироваться складское помещение с учетом пиковых и минимальных загрузок и спроса на продукцию. Эти проблемы важны для экономики предприятия, т.к. во время минимального спроса на продукцию, компания будет выпускать меньше продукции, а постоянные издержки, такие как техническое обслуживание, электричество, обслуживание помещений останутся, поэтому важно на этапе проектирования продумать и оптимизировать как можно больше деталей технологического процесса.

START TIME	END TIME	BLOCKS	FACILITIES	STORAGES
0.000	2880.000	43	1	5

QUEUE	MAX CONT.	ENTRY	ENTRY (0)	AVE. CONT.	AVE. TIME	AVE. (-0)	RETRY
11	1	0	23	23	0.000	0.000	0
12	1	0	24	24	0.000	0.000	0
13	1	0	28	28	0.000	0.000	0
14	1	0	46	46	0.000	0.000	0
TRANSPR	1	0	121	121	0.000	0.000	0
COLA	5	0	171	71	0.468	7.876	13.468

STORAGE	CAP.	REM.	MIN.	MAX.	ENTRIES	AVL.	AVE. C.	UTIL.	RETRY	DELAY
TRAMO1	1500	775	0	960	5035	1	632.782	0.422	0	0
TRAMO2	1000	870	0	580	3850	1	294.384	0.294	0	0
TRAMO3	1000	680	0	505	3120	1	229.853	0.230	0	0
TRAMO4	1000	650	0	385	1960	1	139.682	0.140	0	0
TRANSPR	2500	975	0	1830	5035	1	1296.702	0.519	0	0

TABLE	MEAN	STD. DEV.	RANGE	RETRY FREQUENCY	CUM. %
TIME_01C	797.310	251.966		0	
			340.000 -	470.000	23 19.01
			470.000 -	600.000	0 19.01
			600.000 -	730.000	24 38.84
			730.000 -	860.000	27 61.16
			860.000 -	990.000	1 61.98
			990.000 -	1120.000	46 100.00

SAVEVALUE	RETRY	VALUE
RENDMO	0	2000.000
VELOCID	0	9.000
ESPACIO	0	30.000

*Рис. 5. Отчет эксперимента с 4-мя типами груза*

### Выводы

1. Для проектирования производственной линии можно использовать конвейерную модель.
2. Модель конвейера отражает основные характеристики машины и технологии производства: длину конвейера, очередь загрузки, неравномерную подачу грузов к конвейеру, программируемую разгрузку в различных точках в зависимости от типа груза и т. п.
3. Компьютерная модель может быть использована для определения оптимальных параметров конвейеров различных по длине, скорости ленты, массе штучных грузов, программе загрузки и разгрузки разных типов грузов и др.
4. Используя компьютерную модель, можно заранее быстро просчитать несколько сценариев работы производства и на основе этого сделать экономические расчеты.

### Литература

1. Кудрявцев Е.М. GPSS World. Основы имитационного моделирования различных систем. – М.: ДМК Пресс, 2008. – 320 с.
2. GPSS World. Reference manual. Minuteman Software. P.O. Box 131. Holly Springs, North Carolina, USA, 4ed, 2001. – 700 p.
3. Зуев Ф. Г., Лотков Н.А. Подъемно-транспортные установки. М.: Колос. 2006. – 471 с.

### References

1. Kudryavtsev E. M. GPSS World. Fundamentals of simulation of various systems. – М.: ДМК Press, 2008. – 320 p.
2. GPSS World. Reference manual. Minuteman Software. P.O. Box 131. Holly Springs, North Carolina, USA, 4ed, 2001. – 700 p.
3. Zuev F.G., Lotkov N.A. Hoisting-and-transport installations. М.: Kolos. 2006. – 471 p.