

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОиР РЕСУРСАМИ КАК ЗАДАЧА ТЕОРИИ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

к.т.н. И. И. Лакин

Инжиниринговый центр железнодорожного транспорта (ИЦ ЖТ),  
ведущий специалист

***Аннотация.** При внедрении автоматизированных систем управления (АСУ) техническим обслуживанием и ремонтом (ТОиР) тягового подвижного состава возникают проблемы с материально-техническим обеспечением (МТО). В отличие от заводов-изготовителей в локомотивных депо значительная часть потребности в запасных частях и материалах носит вариативный характер, что существенно усложняет снабжение, создаёт риск отсутствия нужных деталей или их избыток. В статье предлагается решение проблемы с использованием метода Монте Карло (математическое моделирование случайных процессов) и методов теории массового обслуживания. В результате предложен метод управления МТО ТОиР. Метод отлажен с использованием имитационного моделирования на алгоритмическом языке Visual Basic for Applications в среде MS Excel.*

***Ключевые слова.** Тяговый подвижной состав, техническое обслуживание и ремонт, материально-техническое обеспечение, управление ресурсами.*

***Annotation.** When implementing automated control systems (ACS) for traction rolling stock maintenance and repair (MRO), problems arise with logistical support (MTO). Unlike manufacturing plants in locomotive depots, a significant part of the spare parts and materials need is variable, which significantly complicates the supply, creates the risk of missing the necessary parts or their excess. The article proposes a solution to the problem using the Monte Carlo method (mathematical random processes modeling) and methods of queuing theory. As a result, a method for managing the MTO MRO is proposed. The method was debugged using simulation modeling in the algorithmic language Visual Basic for Applications in the MS Excel environment.*

***Keywords.** Traction rolling stock, maintenance and repair, logistics, resource management.*

Основными ресурсами для ТОиР являются (рисунок 1): запасные детали и материалы для ремонта и обслуживания («склад»), трудовые ресурсы (мастера, электромеханики, слесари нужной квалификации), ремонтное оборудование и инструменты, ремонтные позиции («каналы»). Управление ресурсами является одной из основных задач управления производством и известно как ERP-система (Enterprise Resource Planning) [1]. В практической работе предприятий обычно используется пакет программ 1С:ERP [1] или SAP R/3 [2].

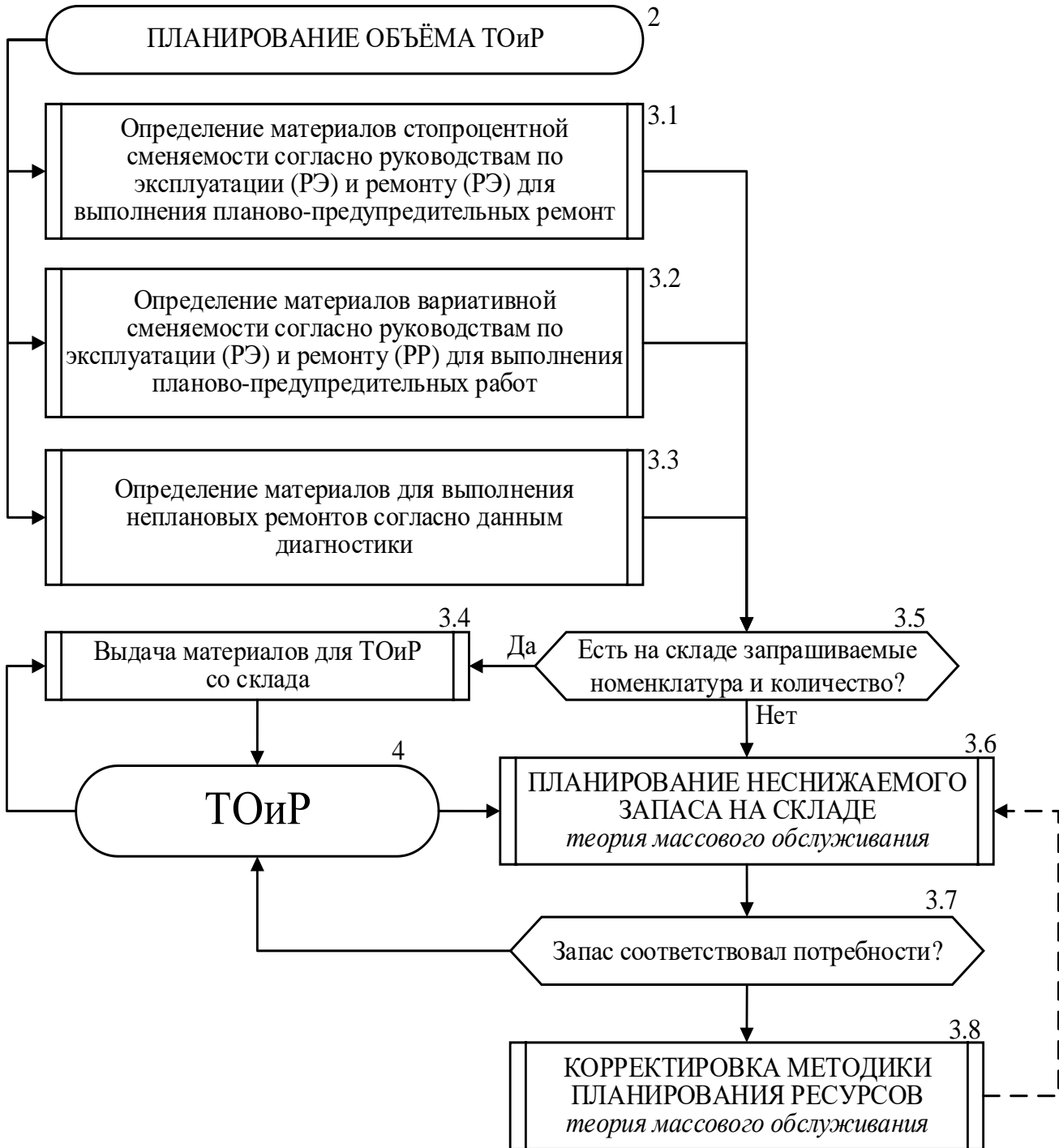


Рисунок 1 – Планирование ресурсов для выполнения ТОиР

Применяемые пакеты программ ERP-управления решают задачи собственно управления ресурсами и в меньшей степени содержат инкапсулированные математические методы для оптимизации процесса, хотя это очень важно. Недостаток ресурсов может привести к остановке технологического процесса, чего нельзя допускать. С другой стороны, большие запасы ресурсов приводят «замораживанию» оборотных средств предприятия, увеличению потребности в них. Лишние трудовые ресурсы приводят к перерасходу заработной платы. Излишний станочный парк приводит к перерасходу капитальных средств, лишним амортизационным отчислениям. Решение этого диалектического конфликта (противоречия) – классическая задача теории массового обслуживания (теории очередей) [3]. Соотношение потока обслуживания (например, наличия касс) и потока покупателей и дало название целому разделу математики, решающему задачу на базе вероятностно-статистических методов: задача всегда решается с учётом вероятности наличия предложения и потребности в обслуживании.

На практике на железнодорожном транспорте задача управления складом решается через создание неснижаемых запасов как процент от потребности. Например, дирекцией по ремонту тягового подвижного состава (ЦТР) предлагалось иметь запас в 5 % от обслуживаемого. Много это или мало – неизвестно, т.к. средств на создание такого запаса выделено не было. А настоящее время задачу пытаются решать через создание нормативов на содержание парка. Но при этом опять не используются динамические статистические модели.

При планировании ресурсов по средней норме допускаются элементарные ошибки, когда любое превышение среднего значения признаётся перерасходом. В результате при нормальном распределении случайной величины в каждом втором случае будет перерасход запасных частей, а в остальных – перерасход. Незнание «правила трёх сигм» [4] приводит к элементарным ошибкам в управлении.

Решение задачи обеспечения ресурсами предлагается осуществить методом математического вероятностного моделирования.

Материально-техническое обеспечение (МТО) запасными частями требует определённого времени  $T_{\text{МТО}}$ , на изготовление  $T_{\text{изг}}$  и доставку  $T_{\text{дст}}$ :

$$T_{\text{МТО}} = T_{\text{изг}} + T_{\text{дст}}. \quad (1)$$

Предлагается для анализа применить методы теории нечётких множеств – функцию принадлежности  $\mu_T$  времени к готовности продукции. Время изготовления можно разбить на пять этапов: минимальное время, быстрее которого изделие не может быть изготовлено согласно технологии  $\Delta T_1$ , время, когда есть вероятность готовности продукции  $\Delta T_2$ , нормативное время готовности продукции  $\Delta T_3$  и время задержки выдачи продукции  $\Delta T_4$ .

$$T_{\text{изг}} = \Delta T_1 + \Delta T_2 + \Delta T_3 + \Delta T_4. \quad (2)$$

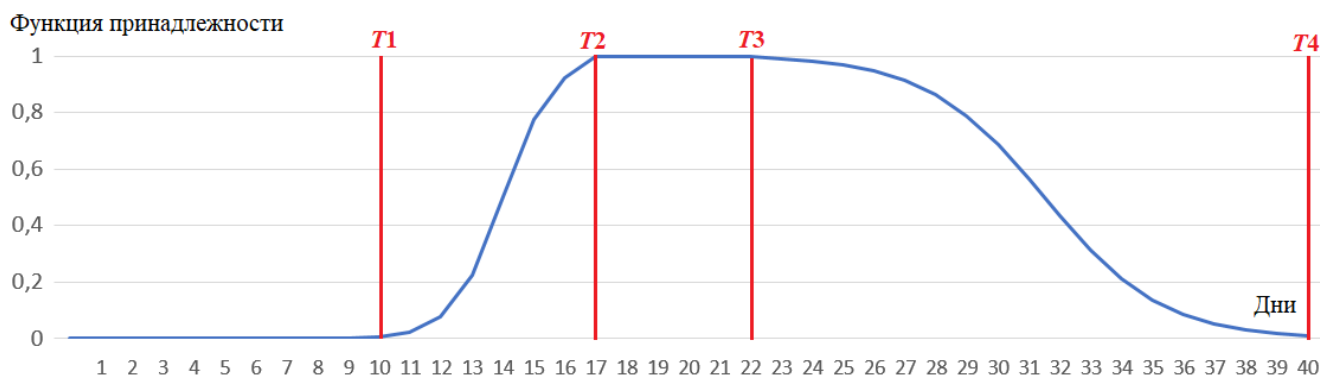
$\Delta T_1 = \text{const}$ , а  $\mu_{T1} = 0$ . Период  $\Delta T_2 = T_2 - T_1$  имеет переходную функцию принадлежности  $\mu_{T2}$ , варианты которых описаны в разделе 2. По умолчанию предлагается взять сигмоидную форму кривой (логистическая кривая), часто используемую в нейросетях:

$$\mu_{T2} = 1 / (1 + \text{Exp}(-t)). \quad (3)$$

Период  $\Delta T_3$  имеет стопроцентную принадлежность:  $\mu_{T3} = 1$ . Период  $\Delta T_4$  также имеет переходную сигмоидную, но обратную форму:

$$\mu_{T4} = 1 - 1 / (1 + \text{Exp}(-t)). \quad (4)$$

Сигмоида в дальнейших расчётах принята по умолчанию. Кривая может быть другая, форма которой можно уточнять по мере накопления статистики. На рисунке 2 приведён пример функции принадлежности к готовности продукции.

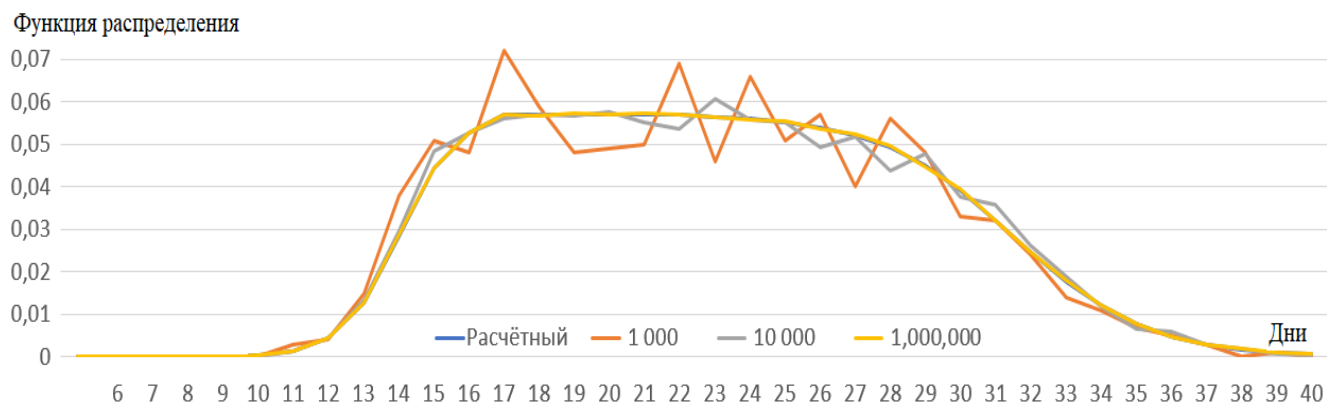


**Рисунок 2 – Функция принадлежности  $\mu$  готовности изделия (пример для 40 дней)**

Моделирование выполнено на VBA в среде Excel. Для расчёта сигмоиды написана функция *Sigmoid*. Для построения функции принадлежности – функция *Zakon*. По функции принадлежности  $\mu_T$  рассчитывается плотность функции распределения  $F(D)$  как отношение значения функции принадлежности  $\mu_{TD}$  за день  $D$  к сумме всех значений функций за  $D_{max}$  дней:

$$F(D) = \mu_T(D) / \sum_1^{D_{max}} \mu_{TD} \quad (5)$$

Случайное значение  $x \in \{0, 1\}$  задаётся функцией VBA:  $x = Rnd$ , по которому определяется попадание в тот или иной день. На рисунке 3 для примера по рисунку 2 приведены результаты расчёта для 1000, 10 000 и 1 000 000 итераций. Из графиков видно, что число итераций должно быть не менее 1 млн.



**Рисунок 3 – Функция принадлежности  $\mu$  готовности изделия при разном числе итераций**

Изделия изготавливаются партиями  $N$ . Партия может изготавливаться одновременно или параллельно по  $M$  изделий, кратных  $N$ . В этом случае при работе счётчика дней  $D = D + 1$  следует суммировать  $D = D + M / N$ .

Доставка имеет ту же логику, что изготовление: есть физически минимально возможное время доставки, нормативное время и возможны задержки. Тогда, последовательно в каждой итерации следует просуммировать время изготовления  $D_{изг}$  и время доставки  $D_{дост}$ :

$$D = D_{изг} + D_{дост}. \quad (6)$$

В таблице 1 приведены исходные данные для много итерационного расчёта, выполненного в этом подразделе. На рисунке 4 приведены результаты расчёта  $D$ ,  $D_{изг}$ ,  $D_{дост}$  при 1 млн итераций.

**Таблица 1 – Исходные данные для моделирования**

	ИЗГ	ДСТ
Длительность минимальная, дней	10	3
Норма начало	17	5
Норма конец	22	6
Длительность максимальная	40	10
Число изделий в партии	10	
Параллельное изготовление	5	

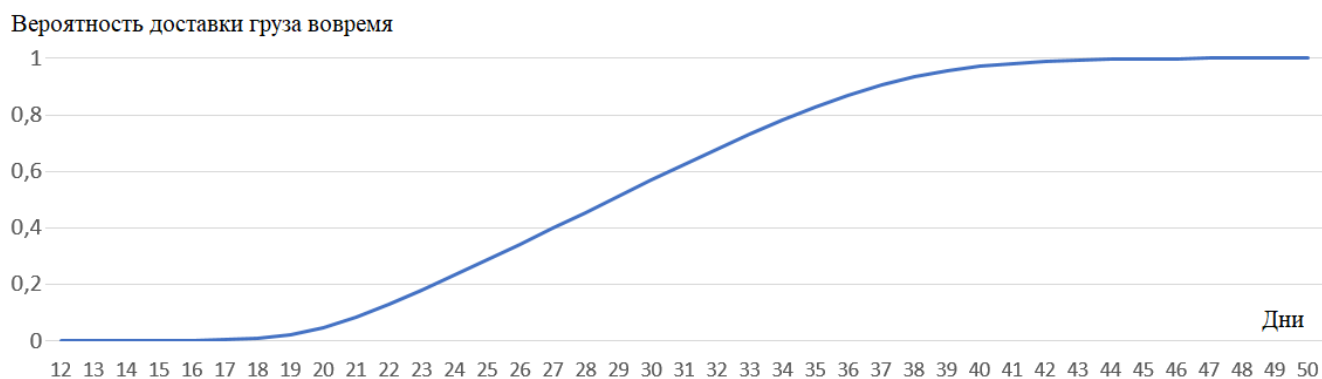


**Рисунок 4 – Функция принадлежности  $\mu$  готовности изделия**

Зная распределение по рисунку 4, можно определить, за сколько дней следует выполнить заказ для доставки груза вовремя с заданной вероятностью  $P$ . Результаты расчёта приведены в таблице 2 и на рисунке 5. Следует обратить внимание, что увеличение вероятности доставки в срок с  $P = 0,97$  до  $P = 1,00$  приводит к росту запаса по времени на 20 % (в примере – 10 дней).

**Таблица 2 – Вероятность доставки запасных частей**

$D$	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
$P$	0,78	0,83	0,87	0,91	0,93	0,96	0,97	0,98	0,99	0,99	0,997	0,998	0,999	0,9998	0,99996	0,99998	1



**Рисунок 5 – Вероятность доставки запасных частей при 1 млн итераций**

В дальнейших расчётах принята вероятность доставки в срок  $P = 0,990$ , что в рассматриваемом примере соответствует 42 дням.

Для ежесуточного обеспечения ТООР  $\Delta R$  ресурсом  $R$  на складе должен быть достаточный запас этого ресурса  $S \geq \Delta R$  при доставке товара на склад за время  $\Delta D$  (при стационарном процессе  $\Delta R = \text{const}$ ,  $\Delta D = \text{const}$ ) в объёме  $\Delta S$ :

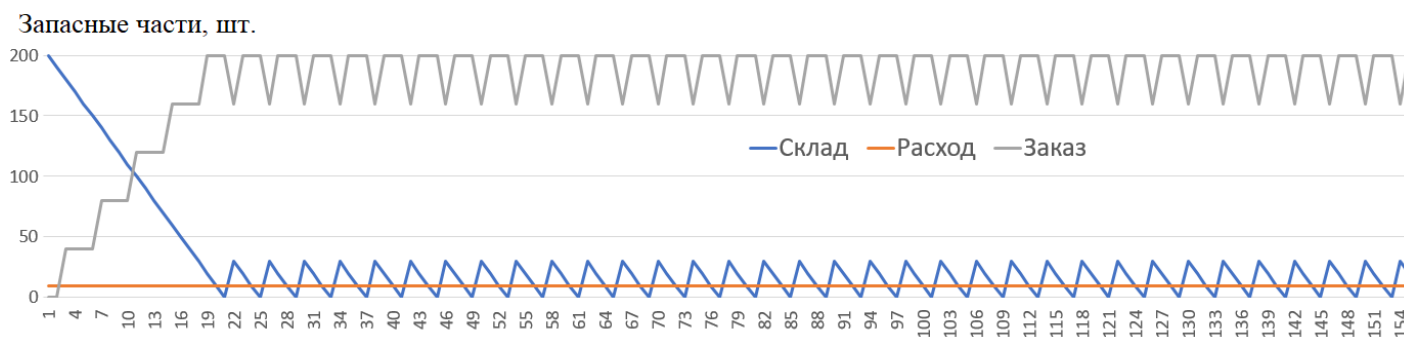
$$S < \Delta R * \Delta D. \quad (7)$$

При наличии  $N$  ранее сделанных заказов запасных частей  $\Delta S$  для последующего заказа дополнительно должно выполняться условие:

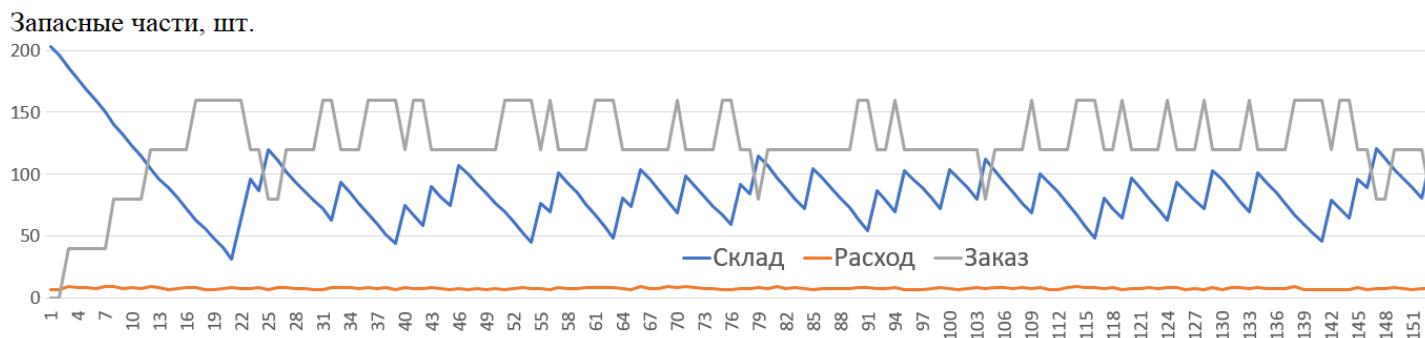
$$S + N \cdot \Delta S < \Delta R \cdot \Delta D. \quad (8)$$

Для проверки выполнения условий заказа запасных частей выполнено математическое имитационное моделирование на VBA в среде Excel. Программа последовательно на каждый день определяет расход запасных частей  $\Delta R$  и контролирует наличие запасных деталей на складе  $S$  для определения необходимости доставки новой партии запасных частей  $\Delta S$  при условии:  $\Delta S \geq \Delta R$ .

На рисунках 6 и 7 показаны результаты моделирования процесса потребления и доставки запасных частей за 200 дней для стационарного и стохастического примеров процессов при математическом ожидании ежедневного потребления  $\Delta R = 10$  шт., времени доставки  $\Delta D = 20$  дней партии  $\Delta S = 40$  шт. с начальным запасом на складе  $S = 220$  шт.



**Рисунок 6 – Расход ресурсов при стационарных процессах потребления и доставки ресурсов**



**Рисунок 7 – Работа склада при стохастических процессах потребления и доставки ресурсов**

Статический процесс является установившемся с минимальным запасом запасных частей на складе. Дальнейшее сокращение запасов на складе возможно за счёт ускорения доставки, например, за счёт создания буферных складов (имеет смысл при наличии нескольких складов на полигоне).

Ситуация меняется при случайном процессе потребления и доставки запасных частей. Видно, что содержание склада (синий график) стал нестабильным и возрос со среднего значения  $Scp = 23$  единицы до  $Scp = 82,2$ .

Ухудшились условия работы материально-технического обеспечения (МТО). Представляется целесообразным проведение много итерационного моделирования работы МТО для оптимизации складских запасов  $S_{cp} \rightarrow \min$ .

Процесс потребления ресурсов носит стохастический (вариативный) характер, значит прогнозирование потребления ресурса  $\Delta R$  и времени доставки ресурса  $\Delta D$  носит вероятностный характер: при расчётах следует задаться вероятностью потребления  $P_R$  и вероятностью доставки  $P_D$ . Возникает риск отсутствия ресурса  $R$ , а если задать  $P_R \rightarrow 1$  и  $P_D \rightarrow 1$ , то возникает пересодержание склада, заморозка оборотных средств, как следствие – повышение себестоимости ТОиР. Следует помнить, что для  $P_R = 1$  и  $P_D = 1$  теоретически потребуется  $S \rightarrow \infty$ .

Задачу оптимизации складских запасов предлагается решить имитационным математическим моделированием по методу Монте-Карло [6]. Характер вероятностных процессов определён в предыдущих подразделах.

На рисунке 8 приведена блок-схема предлагаемого алгоритма управления ресурсами ТОиР на примере поставки ЗИП. В программное обеспечение АСУ ТОиР должен быть инкапсулирован предлагаемый алгоритм, которые периодически запускается на исполнение (блок 1).

Изначально считываются статистические данные о времени изготовления и доставки ЗИП, его потреблении по стопроцентной и вариативной сменяемости, размер партии доставки и другие исходные данные (блок 2), по которым производится подготовка к расчётам, в т.ч. расчёт по статистическим данным и функциям принадлежности  $\mu$  функций распределения изготовления и доставки ЗИП (блок 3).

Задача программы – минимизировать запасы на складе  $S$  так, чтобы минимальный запас  $S_{min}$  не был отрицательным (дефицит ЗИП) с вероятностью  $P$  не менее заданной. При этом управление происходит через время предзаказа ЗИП  $Delta$ . Программа производит много итерационный расчёт, увеличивая каждый раз период планирования:  $Delta = Delta + 1$  (блок 4) до максимально заданного  $DeltaMax$  (блок 5).

Для каждого значения  $Delta$  программа моделирует работу материально-технического снабжения за заданное  $D_{max}$  дней. По умолчанию задано 777 дней (блоки 6 – 7).

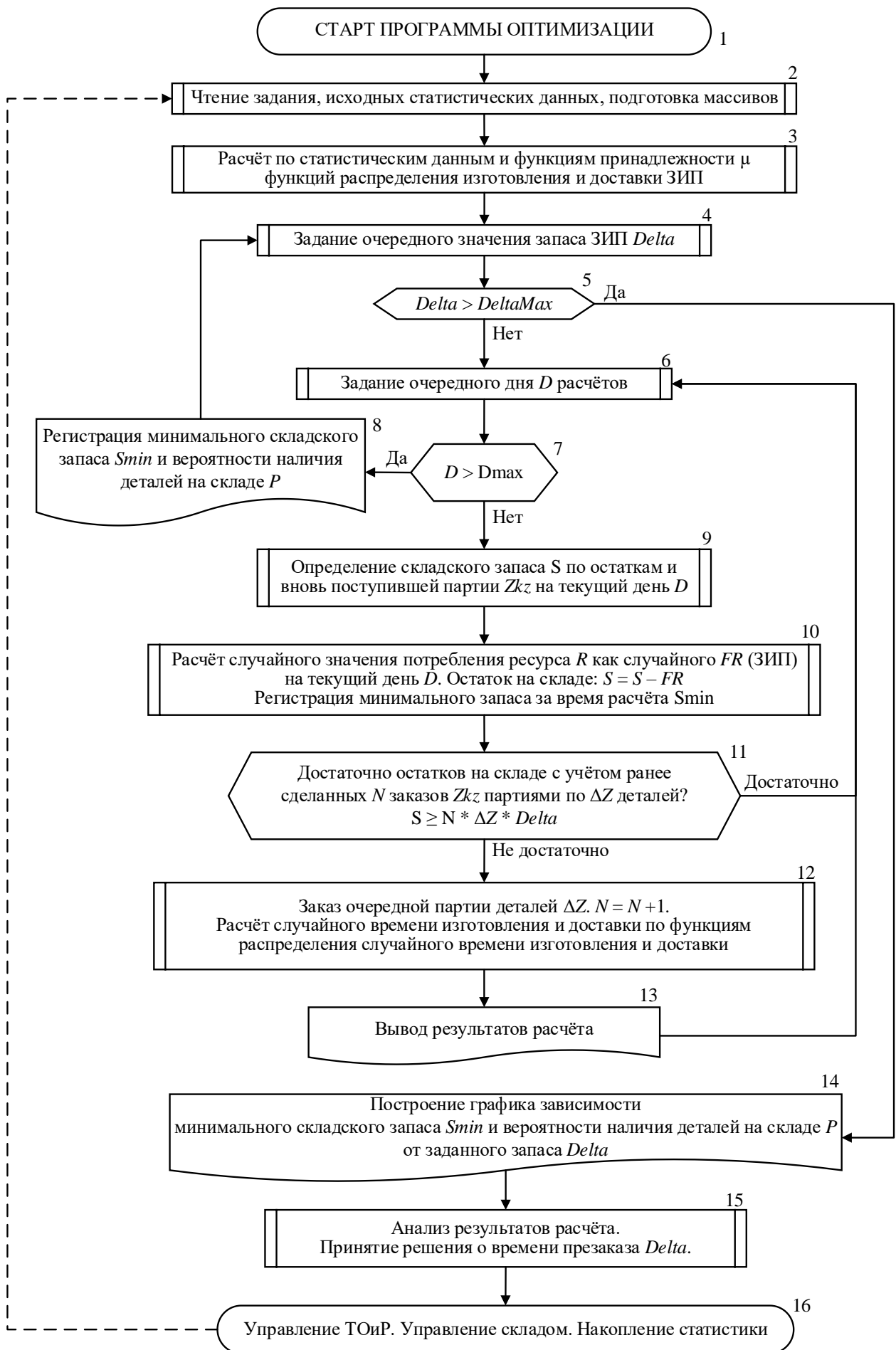


Рисунок 8 – Алгоритм определения неснижаемого запаса ЗИП по  $\Delta$

Для каждого дня программа контролирует складской запас  $S$  (блок 9) с учётом поступления заказов партиями по  $\Delta Z$  изделий и расхода ресурсов  $FR$ . Расход материалов и время их поступления определяются как случайные данные с использованием генератора случайных чисел  $Rnd$ . В этот момент фиксируется минимальный запас на складе  $S_{min}$ .

Для каждого дня  $D$  после выдачи материалов  $FR$  и получения по заказу  $\Delta Z$  (блок 10) следует проверить необходимость следующего заказа по условию:

$$S < N * \Delta Z * Delta. \quad (9)$$

После сравнения (блок 11) в случае необходимости производится заказ (блок 12). Результаты моделирования выводятся на лист (блок 13). И так повторяется для каждого заданного значения  $Delta$  (блок 4). По окончании расчётов строится график (блок 14) и определяется оптимальное значение  $Delta$ . Работа продолжается с продолжением накопления статистики (блок 16).

На рисунках 9 и 10 приведены результаты расчёта по разработанной программе зависимости минимального запаса деталей на складе  $S_{min}$  и вероятности наличия деталей на складе  $P$  для следующих данных:

- длительность изготовления и доставки минимальные: 10 и 3;
- ожидаемой время изготовления и доставки: 17 – 22 и 5 – 6;
- максимальное ожидаемое время изготовления и доставки: 40 и 10;
- число изделий в партии: 30;
- параллельное изготовление: 5;
- стопроцентная сменяемость: 10;
- средняя вариативная сменяемость: 2;
- число дней расчёта: 777.

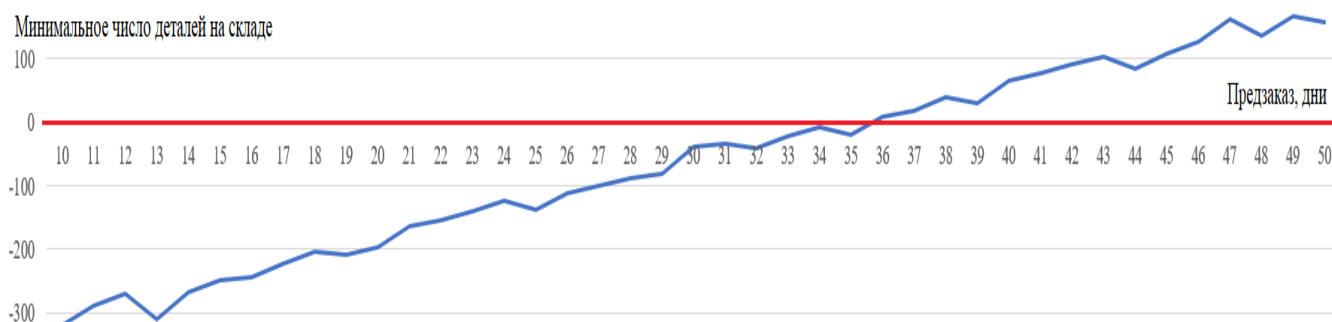
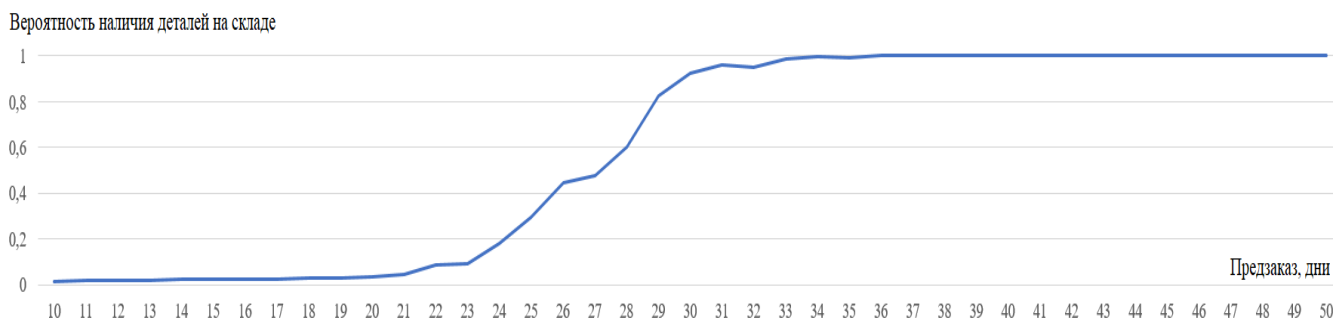


Рисунок 9 – Определение оптимального запаса ресурсов



**Рисунок 10 – Вероятность наличия деталей на складе по рисунку 9**

Расчёты показали, что число дней предзаказа для рассматриваемого примера должно быть не менее 34-х (таблица 3). Таким образом, постоянно обновляя статистику о поступлении и расходе ресурса, можно постоянно корректировать условия управления, отказавшись от статичных нормативов содержания склада [5].

**Таблица 3 – Результаты расчёта по рисункам 9 и 10**

Дней предзаказа <i>Delta</i>	Минимальный остаток	Вероятность наличия деталей
29	-80	0,8237
30	-39	0,9260
31	-34	0,9615
32	-42	0,9498
33	-22	0,9853
34	-7	0,9985
35	-20	0,9897
36	9	1
37	19	1

## ЛИТЕРАТУРА

- 1С:ERP Управление предприятием. Официальный сайт [https:// v8.1c.ru/erp/](https://v8.1c.ru/erp/)
2. Что такое цифровая трансформация / SAP // [www.sap.com/central-asia-caucasus/insights/what-is-digital-transformation.html](http://www.sap.com/central-asia-caucasus/insights/what-is-digital-transformation.html)
3. Пустовой, В. Н. История становления предиктивного ремонта в АО "Трансмашхолдинг" / В. Н. Пустовой, И. И. Лакин // Локомотив. – 2021. – № 10. – С. 12-13. – Текст : непосредственный.
4. Ассоциация Деминга, официальный сайт. – URL: [www.deming.ru](http://www.deming.ru) (дата обращения: 25.01.2021). – Текст электронный.
5. Куцевол, Н. А. Метод формирования неснижаемого запаса материалов по статистике их потребления на техническом обслуживании и ремонте тягового подвижного состава / Н. А. Куцевол, И. И. Лакин, И. В. Пустовой // Материалы VI всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава (Ремонт и Динамика'23)». – Омск: ОмГУПС, 2023. – С. 159-166. – Текст : непосредственный.
6. Михайлов, Г. А. Статистическое моделирование. Методы Монте-Карло: учебное пособие для вузов / Г. А. Михайлов, А. В. Войтишек. — Москва : Издательство Юрайт, 2024. — 323 с. — (Высшее образование). — ISBN 978-5-534-11518-5. — Текст : электронный // Образовательная платформа Юрайт [сайт]. — URL: