

УДК 004.942,

Шамсуваров Ильшат Хурмятович, магистрант, 2 курс. Факультет математики, информационных и авиационных технологий, Ульяновский государственный университет, г. Ульяновск

УЧЁТ ОТКАЗОВ ОБОРУДОВАНИЯ И БРАКА ПРИ ИМИТАЦИОННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ УЧАСТКА МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Аннотация

В статье рассматривается способ учёта случайных факторов при разработке имитационной модели участка механической обработки в среде AnyLogic. В качестве случайных факторов выбраны отказы фрезерных станков, длительность ремонта, вероятность возникновения брака и логика повторной обработки деталей. Рассматриваемый участок включает 20 однотипных фрезерных станков. Принято, что в среднем за неделю происходит один отказ оборудования, а длительность ремонта находится в диапазоне от 2 до 12 часов. Вероятность появления брака принимается равной 1%, при этом 20% бракованных деталей являются неустранимым браком, а 80% направляются на повторную обработку. Предложены параметры модели, логика движения деталей, перечень собираемой статистики и порядок анализа результатов.

Ключевые слова: имитационное моделирование, AnyLogic, фрезерные станки, отказ оборудования, ремонт, брак, повторная обработка, производственный участок.

1. Введение

При построении имитационных моделей производственных процессов важно учитывать не только нормативное время выполнения операций, но и случайные факторы, возникающие в реальном производстве. К таким факторам относятся

отказы оборудования, ремонт, появление брака и необходимость повторной обработки деталей. Если данные явления не учитывать, модель может показывать завышенную производительность и нереалистично высокое выполнение плана.

Особенно важен учёт случайных факторов для участков механической обработки, где оборудование является основным ограничивающим ресурсом. Даже кратковременный отказ одного станка снижает доступный фонд времени, увеличивает очередь перед операцией и может привести к невыполнению производственного плана. Аналогично, появление брака увеличивает фактическую нагрузку на оборудование, если дефектные детали отправляются на повторную обработку.

Целью статьи является описание упрощённого подхода к учёту отказов оборудования и брака при имитационном моделировании производственного участка в AnyLogic. Рассматриваемый подход ориентирован на учебную модель уровня бакалавриата и может использоваться при разработке практического примера в рамках методики создания имитационных моделей производственных процессов.

2. Постановка задачи

Рассматривается участок механической обработки, оснащённый 20 однотипными фрезерными станками. Каждый станок выполняет похожую технологическую операцию, поэтому в модели все станки считаются взаимозаменяемыми. На вход участка поступают детали, которые проходят обработку на свободном станке, затем направляются на контроль качества и покидают систему как годная продукция либо как брак.

В модели необходимо учесть два случайных процесса:

- отказы фрезерных станков и их последующий ремонт;
- появление брака после обработки детали и дальнейшую логику его обработки.

В качестве условных исходных данных принимается, что в среднем на парк из 20 фрезерных станков приходится один отказ в неделю. При отказе один станок становится недоступным на время ремонта. Остальные станки продолжают работу. Длительность ремонта задаётся случайной величиной от 2 до 12 часов.

Вероятность возникновения брака после обработки принимается равной 1%. Среди всех бракованных деталей 20% являются неустранимым браком и списываются, а оставшиеся 80% направляются на повторную обработку на тот же тип оборудования.

3. Условные допущения модели

Для упрощения модели принимаются следующие допущения:

- все 20 фрезерных станков являются однотипными и взаимозаменяемыми;
- каждая деталь может быть обработана на любом свободном станке;
- склад всегда имеет необходимое количество заготовок, поэтому отсутствие материалов не ограничивает выпуск;
- работников ОТК всегда достаточно для проверки деталей на выходе, поэтому контроль качества не образует очередь;
- транспортировка между складом, станками и ОТК не детализируется;
- повторная обработка устранимого брака выполняется на том же типе оборудования;
- время повторной обработки в базовом варианте принимается равным времени основной обработки детали;
- неустранимый брак не заменяется дополнительным запуском новой детали, если это не задано отдельным сценарием.

Такие допущения позволяют сосредоточиться на влиянии отказов и брака на выпуск, загрузку оборудования, очереди и выполнение производственного плана.

4. Моделирование отказов оборудования

Для моделирования отказов оборудования необходимо определить среднее время между отказами одного станка и распределение длительности ремонта. По условной статистике эксплуатации принимается, что весь парк из 20 станков имеет в среднем один отказ в неделю. Следовательно, интенсивность отказов всего парка составляет:

$$\lambda_{\text{park}} = 1 \text{ отказ/неделю.}$$

Так как в парке 20 одинаковых станков, интенсивность отказов одного станка составляет:

$$\lambda_{\text{machine}} = 1 / 20 = 0,05 \text{ отказа/неделю.}$$

Это означает, что один станок в среднем выходит из строя один раз за 20 недель. Если участок работает по графику 5/2 с 8-часовым рабочим днём, недельный фонд времени одного станка составляет 40 часов. Тогда средняя наработка одного станка до отказа равна:

$$T_{\text{failure}} = 20 * 40 = 800 \text{ ч.}$$

Для задания времени до отказа в AnyLogic можно использовать экспоненциальное распределение:

`exponential(800)`

Длительность ремонта принимается случайной величиной в диапазоне от 2 до 12 часов. Для учебной модели можно использовать равномерное распределение `uniform(2, 12)`. Более реалистичным вариантом является треугольное распределение, где наиболее вероятное значение ремонта равно 6 часам:

`triangular(2, 6, 12)`

В этом случае короткие и очень длительные ремонты встречаются реже, а средние значения появляются чаще. Для практической модели рекомендуется использовать именно треугольное распределение.

Таблица 1 - Параметры отказов фрезерных станков

Параметр	Значение
Количество фрезерных станков	20
Среднее число отказов всего парка	1 отказ в неделю
Среднее число отказов одного станка	0,05 отказа в неделю
Среднее время между отказами одного станка	20 недель
Средняя наработка одного станка до отказа	800 ч
Минимальное время ремонта	2 ч
Наиболее вероятное время ремонта	6 ч
Максимальное время ремонта	12 ч
Распределение времени до отказа	exponential(800)
Распределение времени ремонта	triangular(2, 6, 12)

В AnyLogic отказы могут быть реализованы через элемент Downtime, связанный с ресурсным пулом фрезерных станков. При наступлении отказа одна единица ресурса становится недоступной на время ремонта. После завершения ремонта станок снова возвращается в доступное состояние.

5. Моделирование брака и повторной обработки

Для учёта качества обработки в модель вводится вероятность появления брака. В рассматриваемой задаче процесс механической обработки считается достаточно стабильным, поэтому вероятность брака принимается малой:

$$p_{\text{defect}} = 0,01.$$

Это означает, что в среднем 1% обработанных деталей будет иметь дефект. После обработки каждая деталь проходит контроль качества. Если деталь признана годной, она направляется на выход из модели. Если обнаружен брак, выполняется дополнительная проверка на устранимость дефекта.

Вероятность неустраимого брака среди всех бракованных деталей принимается равной:

$$p_{\text{scrap}} = 0,20.$$

Соответственно, вероятность устранимого брака среди всех бракованных деталей составляет:

$$p_{\text{rework}} = 1 - 0,20 = 0,80.$$

Общая вероятность направления детали на повторную обработку от всего выпуска равна:

$$p_{\text{defect_rework}} = 0,01 * 0,80 = 0,008.$$

Общая вероятность списания детали как неустраимого брака равна:

$$p_{\text{defect_scrap}} = 0,01 * 0,20 = 0,002.$$

Следовательно, на 1000 обработанных деталей в среднем ожидается около 10 бракованных деталей, из которых примерно 8 деталей будут направлены на повторную обработку, а около 2 деталей будут списаны как неустраимый брак.

Таблица 2 - Параметры качества обработки

Показатель	Обозначение	Значение
Вероятность появления брака	p_{defect}	0,01
Вероятность годной детали	p_{good}	0,99
Вероятность неустраимого брака среди бракованных	p_{scrap}	0,20
Вероятность устранимого брака среди бракованных	p_{rework}	0,80
Общая вероятность повторной обработки	$p_{\text{defect_rework}}$	0,008
Общая вероятность списания	$p_{\text{defect_scrap}}$	0,002
Ресурс повторной обработки	-	тот же фрезерный станок

В AnyLogic проверку факта брака можно реализовать через условие `randomTrue(0.01)`. Если результат равен `true`, деталь считается бракованной. Далее вторым условием `randomTrue(0.20)` определяется, является ли брак неустранимым. Если условие истинно, деталь направляется в `Sink_scrap`. Если условие ложно, деталь возвращается в очередь перед обработкой.

Упрощённая логика движения детали имеет следующий вид:

Source -> Queue -> Service_processing -> SelectOutput_defect -> Sink_good

Если обнаружен брак: SelectOutput_scrap -> Sink_scrap или возврат на повторную обработку.

6. Статистика, собираемая в модели

Для оценки влияния отказов и брака на работу участка необходимо собирать статистику по нескольким группам показателей: выпуск, отказы, ремонт, качество, загрузка оборудования и очереди.

Таблица 3 - Статистика по отказам оборудования

Показатель	Назначение
Количество отказов за период моделирования	Проверка частоты отказов
Среднее время ремонта	Проверка заданного распределения ремонта
Суммарное время ремонта	Оценка потери фонда времени
Доля времени оборудования в ремонте	Оценка влияния отказов на мощность участка
Количество работающих станков во времени	Контроль доступности ресурсов
Очередь перед оборудованием во время отказов	Оценка влияния отказов на ожидание деталей

Таблица 4 - Статистика по качеству

Показатель	Назначение
------------	------------

Количество обработанных деталей	База для расчёта процента брака
Количество годных деталей	Фактический выпуск продукции
Количество бракованных деталей	Оценка общего уровня брака
Количество деталей на повторной обработке	Оценка дополнительной нагрузки на оборудование
Количество списанных деталей	Оценка потерь от неустранимого брака
Доля брака, %	Проверка соответствия заданной вероятности 1%
Доля неустранимого брака, %	Проверка соответствия заданной вероятности 20% среди брака

Таблица 5 - Итоговая статистика модели

Показатель	Назначение
Количество запущенных деталей	Проверка входного потока
Количество завершённых годных деталей	Оценка выполнения плана
Количество незавершённых деталей	Проверка наличия деталей в системе на конец периода
Средняя загрузка оборудования	Оценка использования станков
Средняя длина очереди	Выявление перегрузки участка
Среднее время производственного цикла	Оценка времени прохождения детали через систему

7. Расчёт основных показателей

Доля брака рассчитывается по формуле:

$$B = N_{\text{defect}} / N_{\text{processed}} * 100\%,$$

где B - доля брака, N_defect - количество бракованных деталей, N_processed - общее количество обработанных деталей.

Доля неустранимого брака среди всех бракованных деталей определяется как:

$$B_{\text{scrap}} = N_{\text{scrap}} / N_{\text{defect}} * 100\%,$$

где N_{scrap} - количество деталей, списанных как неустранимый брак.

Дополнительная трудоёмкость, вызванная повторной обработкой, может быть определена по формуле:

$$T_{rework} = N_{rework} * t_{proc},$$

где T_{rework} - дополнительное время обработки, N_{rework} - количество деталей, отправленных на повторную обработку, t_{proc} - среднее время обработки одной детали.

Потеря фонда времени из-за отказов оборудования рассчитывается следующим образом:

$$L = T_{repair_total} / F_{park} * 100\%,$$

где L - доля потерянного фонда времени, T_{repair_total} - суммарное время ремонта, F_{park} - общий фонд времени парка оборудования.

Например, если за неделю произошёл один отказ и ремонт длился 6 часов, а общий фонд времени парка 20 станков составляет 800 часов, то потеря фонда времени будет равна:

$$L = 6 / 800 * 100\% = 0,75\%.$$

8. Верификация случайных параметров

Так как отказы оборудования и появление брака являются случайными процессами, результаты одного прогона модели могут отличаться от заданных средних значений. Например, при вероятности брака 1% и небольшом плане выпуска в отдельном прогоне может не появиться ни одной бракованной детали. Это не является ошибкой модели.

Для проверки корректности случайных параметров рекомендуется выполнять серию прогонов или увеличивать период моделирования. При моделировании 10 недель ожидаемое количество отказов всего парка оборудования составляет около 10. При моделировании 1000 обработанных деталей ожидается около 10

бракованных деталей, из которых примерно 8 будут направлены на повторную обработку и 2 будут списаны.

Таблица 6 - Проверка случайных параметров модели

Показатель	Ожидаемое значение	Комментарий
Отказы за 1 неделю	около 1	в отдельном прогоне возможно 0, 1 или 2 отказа
Отказы за 10 недель	около 10	проверять лучше по серии прогонов
Среднее время ремонта	около 6-7 ч	значения должны находиться в диапазоне 2-12 ч
Доля брака	около 1%	проверять на большом числе деталей
Доля неустранимого брака среди брака	около 20%	проверять по накопленной статистике
Доля повторной обработки среди брака	около 80%	детали должны возвращаться на тот же ресурс

9. Ожидаемое влияние отказов и брака на результаты модели

Введение отказов оборудования и брака должно привести к более реалистичным результатам моделирования. Отказы уменьшают доступный фонд времени оборудования, что может увеличить очередь перед станками и снизить выпуск. Повторная обработка устранимого брака также увеличивает нагрузку на оборудование, поскольку часть деталей проходит обработку повторно.

При низкой вероятности брака влияние качества на выпуск будет небольшим, однако даже малое количество повторных обработок может иметь значение при высокой загрузке оборудования. Неустранимый брак напрямую снижает количество годных деталей и, следовательно, процент выполнения

производственного плана, если в модели не предусмотрен дозапуск деталей взамен списанных.

Таким образом, учёт отказов и брака позволяет получить более осторожную и приближенную к реальному производству оценку работы участка.

10. Заключение

В статье рассмотрен упрощённый способ учёта отказов оборудования и брака при имитационном моделировании участка механической обработки. Для парка из 20 фрезерных станков предложено задавать среднюю наработку одного станка до отказа 800 часов, что соответствует одному отказу всего парка в неделю. Длительность ремонта рекомендуется задавать треугольным распределением $\text{triangular}(2, 6, 12)$.

Для моделирования качества обработки предложено использовать вероятность брака 1%. Среди бракованных деталей 20% считаются неустранимым браком, а 80% направляются на повторную обработку на тот же тип оборудования. Такая логика достаточно проста для реализации в AnyLogic и позволяет оценить влияние качества на загрузку оборудования, выпуск годной продукции и выполнение плана.

Предложенный подход может использоваться как часть учебной имитационной модели производственного участка. Он не требует сложной оптимизации, но позволяет показать важность случайных факторов при анализе производственных процессов.

Список литературы

1. Вентцель Е.С. Теория вероятностей : учебник для вузов. - М. : КноРус, 2021. - 664 с.
2. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика : учеб. пособие для вузов. - 12-е изд., перераб. и доп. - М. : Юрайт, 2022. - 479 с.

3. Banks J., Carson J.S., Nelson B.L., Nicol D.M. Discrete-Event System Simulation. - 5th ed. - Pearson, 2010.
4. Law A.M. Simulation Modeling and Analysis. - 5th ed. - New York : McGraw-Hill Education, 2015.
5. Справка AnyLogic // Документация AnyLogic. URL: <https://anylogic.help/ru/index.html>.