

УДК 658.5.012.14

DOI: 10.22213/2413-1172-2024-4-31-44

Оценка эффективности роботизированных линий розлива с использованием имитационного моделирования и эксплуатационных коэффициентов

Е. С. Квас, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия

В. П. Кузьменко, кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия

В данном исследовании представлена имитационная модель для оценки производственной устойчивости роботизированной линии розлива газированных напитков в стеклянные бутылки объемом 0,5 литра. Целью исследования являлась разработка имитационной модели для анализа факторов, влияющих на стабильность работы и производственный баланс линии. Модель учитывает стохастические характеристики времени обработки на каждой станции, вероятность отказов и восстановления оборудования, а также динамику заполнения буферов, что позволяет оценить и поддерживать стабильность работы линии. В ходе моделирования были исследованы гипотезы о влиянии емкости буферов на коэффициент общей эффективности оборудования и процессы планирования ресурсов на основе данных о частоте отказов. Результаты моделирования показали, что существует оптимальное значение емкости буферов, при котором достигается максимальная эффективность линии. Разработанная имитационная модель предоставляет эффективный инструмент для анализа и оптимизации процесса управления емкостью буфера в линии розлива. Научная новизна исследования заключается в интеграции стохастических методов и динамики производственного процесса с вероятностью изменения показателей качества продукции на каждом этапе. Практическая значимость работы состоит в возможности непосредственного применения модели для оптимизации производственных линий и повышения их конкурентоспособности на рынке.

Ключевые слова: симуляционное моделирование, роботизированная линия розлива, оптимизация производительности, управление производственными процессами, коэффициент общей эффективности оборудования.

Введение
Развитие технологий автоматизации и внедрение принципов Индустрии 4.0 способствуют улучшению производственных процессов, повышению качества продукции и увеличению эффективности производственных систем. Одним из ключевых компонентов современного производства являются роботизированные линии розлива, которые активно используются в пищевой промышленности. Для оценки эффективности таких линий важно учитывать эксплуатационные коэффициенты, такие как коэффициент общей эффективности оборудования (ОЭО), техническую эффективность (ТЭ), а также анализировать возможные простои, связанные с неисправностями оборудования и вводить дополнительные критерии и коэффициенты, позволяющие оценивать специфические параметры и особенности данного оборудования.

Использование имитационного моделирования позволяет осуществить детальную оценку и оптимизацию работы роботизированных линий розлива [1–3]. Моделирование позволяет

рассмотреть влияние различных параметров, таких как емкость буферов, частота отказов и время простоя, на производительность системы [4, 5], также на данный момент актуально моделирование и оптимизация роботизированных линий производства на основе нормальных распределений и анализа производственных балансов [6, 7].

Кроме того, применяются методы проектирования и оптимизации буферов в производственных линиях с использованием генетических алгоритмов и анализа конечных возмущений. Однако существующие исследования не учитывают специфики непрерывных производственных процессов, как в случае с линией розлива, и отсутствует учет комплексных стохастических характеристик времени обработки на станциях, вероятности отказов и восстановления оборудования [8–10].

Данная работа посвящена исследованию возможностей управления качеством, стандартизации отдельных параметров производственных линий через введение эксплуатационных коэффициентов для повышения эффективности

использования роботизированных линий розлива на основе имитационного и математического моделирования.

Цель исследования – разработка имитационной модели для оценки устойчивости производственного потока роботизированной линии розлива.

Основные задачи, материалы и методы

В ходе исследования необходимо решить следующие задачи:

- разработка имитационной модели роботизированной линии розлива для анализа влияния эксплуатационных параметров на производственную устойчивость и стабильность;
- постановка гипотез, направленных на проверку влияния емкости буферов и частоты отказов на частоту простоев и коэффициент готовности оборудования;
- оценка влияния эксплуатационных параметров, таких как емкость буфера и интенсивность отказов, на общую производительность линии и коэффициент качества продукции, характеризующий долю изделий, соответствующих стандартам качества;
- включение показателей качества продукции в модель для оценки стабильности качества продукции;
- анализ оптимальных значений параметров производственного процесса, таких как вместимость буферов и интенсивность восстановлений, с целью минимизации вероятности простоев и максимизации коэффициента общей эффективности оборудования (ОЭО);
- проведение анализа результатов моделирования и определение факторов, влияющих на производительность.

Для проведения исследований были разработаны модели – имитационная и математическая – роботизированной линии розлива с использованием программного обеспечения Python и MatLab. Основные параметры, рассматриваемые в моделях, включают текущую скорость линии, емкость буферов, время простоев, а также частоту отказов и ремонтных работ. Модели учитывают два вида простоев: плановые остановки и внеплановые простои из-за неисправностей.

Математическое моделирование включает разработку дифференциальных уравнений, описывающих динамику производственного процесса, а также построение стохастических моделей для анализа вероятности отказов и их влияния на производительность.

Гипотезы, проверяемые в ходе исследования, включают:

- увеличение емкости буферов приводит к снижению вероятности остановки линии и повышению общей эффективности;

- оптимизацию расписания ремонтных работ, что уменьшает количество внеплановых простоев и повышает коэффициент технической эффективности;

- планирование и распределение ресурсов на основе данных о частоте отказов могут существенно повысить производительность.

Для оценки производительности использовались следующие эксплуатационные коэффициенты:

- коэффициент общей эффективности оборудования (ОЭО) – показатель, учитывающий доступность, производительность и качество;

- коэффициент эксплуатационной готовности (ЭГ) – доля времени, в течение которого линия может выполнять свои функции.

Похожий подход оптимизации производственных линий посредством моделирования используется и зарубежными авторами [11–13], однако они в своих исследованиях фокусируются на производственных линиях модульного строительства, где временные задержки и отказоустойчивость линий имеют более простую модель. Такой подход применим к ограниченному числу производственных циклов и не учитывает сложные взаимосвязи между эксплуатационными коэффициентами и качеством продукции.

Описание задачи и методов моделирования исследуемого производственного процесса

Рассмотрим производственную линию, состоящую из N последовательно соединенных станций (роботизированных ячеек). Каждая станция выполняет определенную операцию и может быть представлена как система массового обслуживания. Между станциями могут располагаться буферные емкости с ограниченной вместимостью B_i , где $i = 1, 2, \dots, N - 1$.

На данном этапе должны быть описаны допущения модели, которые приняты как следующие факторы:

1. Линия предназначена для розлива газированных напитков в стеклянные бутылки объемом 0,5 л.

2. Линия состоит из $N = 5$ последовательно соединенных станций: мойка и стерилизация бутылок; наполнение бутылок напитком; закупоривание бутылок крышками; наклейка этикеток на бутылки; упаковка бутылок в коробки.

3. Станции работают независимо друг от друга за исключением влияния переполнения или опустошения буферов.

4. Между станциями расположены буферные емкости с ограниченной вместимостью B_i , где $i = 1, 2, 3, 4$; буферы предназначены для накопления продукции и предотвращения остановки линии из-за неравномерности работы станций.

5. Время обработки на каждой станции является случайной величиной, распределенной по нормальному закону с математическим ожиданием t_i и стандартным отклонением σ_{ii} ; время обработки на станции i является случайной величиной T_i , распределенной по нормальному закону [14]:

$$T_i \approx N(t_i, \sigma_{ii}^2),$$

где t_i – среднее время обработки на станции i .

6. Отказы оборудования на станциях происходят с интенсивностью λ_i , подчиняясь экспоненциальному закону распределения времени до отказа.

7. Время восстановления (ремонта) оборудования на станциях является случайной величиной, распределенной по экспоненциальному закону с параметром μ_i .

8. Буферные емкости имеют ограниченную вместимость B_i , переполнение буфера приводит к остановке предыдущей станции, а опустошение буфера – к остановке последующей станции; каждая станция (кроме последней) имеет свой буфер.

9. Показатель качества продукции на выходе каждой станции является случайной величиной, распределенной по нормальному закону с математическим ожиданием μ_{Qi} и стандартным отклонением σ_{Qi} .

10. Готовое изделие считается соответствующим требованиям, если его показатель качества находится в заданном диапазоне $[Q_{\min}, Q_{\max}]$.

Динамику заполнения буферов можно описать системой дифференциальных уравнений

$$\frac{db_i(t)}{dt} = R_{i-1}(t) - R_i, \quad i = 1, 2, \dots, N - 1,$$

где $b_i(t)$ – количество изделий в буфере i в момент времени t ; $R_i(t)$ – скорость обработки на станции i в момент времени t , которая зависит от состояния станции (работает или находится в простое).

Каждая станция может находиться в одном из двух состояний:

- рабочее состояние с вероятностью $P_{\text{работы},i}(t)$;

- состояние простоя с вероятностью $P_{\text{простоя},i}(t) = 1 - P_{\text{работы},i}(t)$.

Вероятность нахождения станции в рабочем состоянии описывается дифференциальным уравнением

$$\frac{dP_{\text{работы},i}(t)}{dt} = -\lambda_i P_{\text{работы},i}(t) + \gamma_i P_{\text{простоя},i}(t),$$

где γ_i – интенсивность восстановления (ремонта) оборудования на станции i .

Решение данного уравнения дает стационарную вероятность работы станции:

$$P_{\text{работы},i} = \frac{\gamma_i}{\lambda_i + \gamma_i}.$$

Таким образом, средняя скорость обработки на станции i

$$\bar{R}_i = \frac{1}{t_i} P_{\text{работы},i}.$$

Коэффициент эксплуатационной готовности станции i

$$K_{\text{готовности}} = \frac{\lambda_i}{(\lambda_i + \gamma_i)}$$

отражает долю времени, в течение которого станция способна выполнять свои функции.

Общая производительность линии определяется минимальной скоростью работы станций с учетом их вероятностей простоев:

$$\bar{R}_{\text{линии}} = \min_i (\bar{R}_i).$$

Коэффициент общей эффективности оборудования (ОЭО) для линии рассчитывается как

$$\text{ОЭО} = K_{\text{готовности}} P Q,$$

где P – производительность, отношение фактической скорости работы к номинальной; Q – коэффициент качества – доля годной продукции.

В контексте данной модели, если предположить, что качество продукции и номинальная скорость постоянны, ОЭО будет напрямую зависеть от коэффициента готовности и производительности станций.

Для точного прогнозирования эксплуатационных параметров линии розлива требуется учет стохастических характеристик, связанных с работой оборудования и его надежностью. В этом контексте аналогично, как в исследова-

ниях Григорьева, Шерстнева, где описывается использование авторегрессионных методов для прогнозирования параметров инфокоммуникационных систем, также используются стохастические модели и методы анализа данных для прогнозирования и оценки эффективности производственного процесса [15–17]. Отсутствие общих критериев качества приводит к несоответствиям в управлении качеством. Введение коэффициента согласованности качества позволяет количественно оценить стабильность и однородность качества продукции на линии.

Рассмотрим введение коэффициента согласованности качества ($K_{с.к.}$), который представляет собой отношение математического ожидания (среднее значение) показателя качества продукции (μ_Q) к стандартному отклонению показателя качества (σ_Q):

$$K_{с.к.} = \frac{\mu_Q}{\sigma_Q}.$$

Коэффициент качества Q в формуле ОЭО представляет собой долю продукции, соответствующей установленным стандартам качества. На данном этапе достаточно предположить, что показатель качества продукции распределен нормально с параметрами μ_Q и σ_Q . Это связано с тем, что в технологическом процессе производства продукции качество каждого изделия зависит от множества независимых или слабо зависимых факторов: точность дозирования, стабильность работы оборудования, колебания температуры и давления, качество сырья и др.

Согласно центральной предельной теореме сумма большого числа независимых случайных величин с конечными средними и дисперсиями стремится к нормальному распределению. Поэтому суммарное влияние множества факторов на показатель качества продукции может быть аппроксимировано нормальным распределением [18, 19]. Показатель качества продукции в большинстве случаев является непрерывной величиной, значения которой распределены вокруг некоторого среднего значения μ_Q . Отклонения от среднего значения возможны как в положительную, так и в отрицательную сторону, что соответствует симметрии нормального распределения. Тогда и вероятность того, что случайное изделие соответствует требованиям качества, определяется через функцию нормального распределения.

Если задан диапазон допустимых значений показателя качества $[Q_{\min}, Q_{\max}]$, то коэффициент качества Q можно выразить как

$$Q = P(Q_{\min} \leq Q_i \leq Q_{\max}) = \Phi\left(\frac{Q_{\max} - \mu_Q}{\sigma_Q}\right) - \Phi\left(\frac{Q_{\min} - \mu_Q}{\sigma_Q}\right),$$

где $\Phi(z)$ – функция распределения стандартного нормального распределения.

Введем безразмерные переменные:

$$Z_{\min} = \left(\frac{Q_{\min} - \mu_Q}{\sigma_Q}\right) = \left(\frac{Q_{\min}}{\mu_Q} - 1\right) K_{с.к.};$$

$$Z_{\max} = \left(\frac{Q_{\max} - \mu_Q}{\sigma_Q}\right) = \left(\frac{Q_{\max}}{\mu_Q} - 1\right) K_{с.к.}.$$

Таким образом, зависимость Q от $K_{с.к.}$ принимает вид

$$Q = \Phi(Z_{\max}) - \Phi(Z_{\min}),$$

что указывает на то, что Q является сложной функцией от $K_{с.к.}$, и линейного приближения здесь недостаточно. Коэффициент качества Q является функцией от коэффициента согласованности качества $K_{с.к.}$. При увеличении $K_{с.к.}$ (то есть при уменьшении σ_Q) коэффициент качества Q возрастает и стремится к 1, что соответствует производству продукции высокого качества с минимальной вариабельностью.

Вероятность отказа станции за малый промежуток времени Δt

$$P_{\text{отказа},i} = \lambda_i \Delta t.$$

Вероятность восстановления станции за Δt

$$P_{\text{восстановления},i} = \mu_i \Delta t.$$

Изменение количества изделий в буфере i

$$\Delta b_i(t + \Delta t) = b_i(t) + R_{i-1}(t) \Delta t - R_i(t) \Delta t,$$

где $b_i(t)$ – количество изделий в буфере i в момент времени t ; $R_{i-1}(t)$ – скорость выхода продукции с предыдущей станции; $R_i(t)$ – скорость обработки на станции i , при $0 \leq \Delta b_i(t) \leq B_i$, если $\Delta b_i(t) = B_i$, то станция $i-1$ останавливается из-за переполнения буфера, если $\Delta b_i(t) = 0$, то станция i останавливается из-за опустошения буфера,

$$R_i(t) = \begin{cases} \frac{1}{T_i}, & \text{если станция работает,} \\ 0, & \text{если станция простаивает,} \end{cases}$$

где T_i – время обработки на станции i , полученное из распределения $N(t_i, \sigma_{ii}^2)$.

Номинальная производительность станции i

$$P_{\text{ном},i} = \frac{1}{t_i};$$

фактическая производительность станции i

$$P_{\text{факт},i} = P_{\text{ном},i} K_{\text{готовности},i} \eta_i,$$

где η_i – коэффициент эффективности станции, учитывающий простои из-за буферов.

Производительность линии

$$P_{\text{линии}} = \min_i (P_{\text{факт},i}).$$

Вероятность того, что изделие станции i годно,

$$K_{Q,i} = \Phi\left(\frac{Q_{\text{max}} - \mu_Q}{\sigma_Q}\right) - \Phi\left(\frac{Q_{\text{min}} - \mu_Q}{\sigma_Q}\right),$$

общий коэффициент качества продукции

$$K_Q = \prod_{i=1}^N K_{Q,i},$$

где $K_{Q,i} = P(Q_{\text{min}} \leq Q_i \leq Q_{\text{max}})$ – вероятность того, что показатель качества на станции i соответствует требованиям.

Однако такой подход предполагает независимость показателей качества на разных станциях, что справедливо только при отсутствии внутреннего (межоперационного) контроля качества. В производственных процессах наличие контроля качества между операциями приводит к зависимостям между событиями, связанными с качеством продукции на разных станциях.

Для учета зависимостей между станциями будем использовать условные вероятности. Общий коэффициент качества продукции $K_{\text{общ},Q}$ можно выразить как

$$K_{\text{общ},Q} = K_{Q_1} \prod_{i=2}^N P(Q_i \in [Q_{\text{min}}, Q_{\text{max}}] | Q_{i-1} \in [Q_{\text{min}}, Q_{\text{max}}]),$$

где $P(Q_i | Q_{i-1})$ – условная вероятность того, что показатель качества на станции i находится в заданном диапазоне при условии, что на станции $i - 1$ показатель качества также соответствует требованиям.

Предположим, что показатели качества Q_i и Q_{i-1} имеют совместное нормальное распределение с заданными математическими ожида-

ниями, дисперсиями и коэффициентом корреляции $\rho_{i,i-1}$:

$$\begin{pmatrix} Q_{i-1} \\ Q_i \end{pmatrix} \approx N \left(\begin{pmatrix} \mu_{Q_{i-1}} \\ \mu_{Q_i} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \sigma_{Q_{i-1}}^2 & \rho_{i,i-1} \sigma_{Q_{i-1}} \sigma_{Q_i} \\ \rho_{i,i-1} \sigma_{Q_{i-1}} \sigma_{Q_i} & \sigma_{Q_i}^2 \end{pmatrix} \right).$$

Тогда условная вероятность $P(Q_i \in [Q_{\text{min}}, Q_{\text{max}}] | Q_{i-1} \in [Q_{\text{min}}, Q_{\text{max}}])$ вычисляется на основе условного нормального распределения.

Найдем условное распределение Q_i при условии $Q_{i-1} \in [Q_{\text{min}}, Q_{\text{max}}]$. Условное распределение $Q_i | Q_{i-1}$ также является нормальным с параметрами

$$\begin{aligned} \mu_{Q_i|Q_{i-1}} &= \mu_{Q_i} + \rho_{i,i-1} \frac{\sigma_{Q_i}}{\sigma_{Q_{i-1}}} (Q_{i-1} - \mu_{Q_{i-1}}), \\ \sigma_{Q_i|Q_{i-1}}^2 &= \sigma_{Q_i}^2 (1 - \rho_{i,i-1}^2). \end{aligned}$$

Вычислим условную вероятность:

$$\begin{aligned} P(Q_i \in [Q_{\text{min}}, Q_{\text{max}}] | Q_{i-1}) &= \\ &= \Phi\left(\frac{Q_{\text{max}} - \mu_{Q_i|Q_{i-1}}}{\sigma_{Q_i|Q_{i-1}}}\right) - \Phi\left(\frac{Q_{\text{min}} - \mu_{Q_i|Q_{i-1}}}{\sigma_{Q_i|Q_{i-1}}}\right). \end{aligned}$$

Так как Q_{i-1} является случайной величиной в диапазоне $[Q_{\text{min}}, Q_{\text{max}}]$, необходимо интегрировать условную вероятность по Q_{i-1} :

$$\begin{aligned} P(Q_i \in [Q_{\text{min}}, Q_{\text{max}}] | Q_{i-1} \in [Q_{\text{min}}, Q_{\text{max}}]) &= \\ &= \frac{1}{K_{Q_{i-1}}} \int_{Q_{\text{min}}}^{Q_{\text{max}}} P(Q_i \in [Q_{\text{min}}, Q_{\text{max}}] | Q_{i-1}) f_{Q_{i-1}}(Q_{i-1}) dQ_{i-1}, \end{aligned}$$

где $f_{i-1}(Q_{i-1})$ – плотность вероятности Q_{i-1} .

Для практических расчетов можно использовать численные методы или приближения. В случае небольших корреляций между станциями ($\rho_{i,i-1}$ близко к нулю) зависимость можно считать слабой, и тогда произведение вероятностей будет приемлемым приближением. Однако для более точных результатов рекомендуется проводить моделирование с учетом реальных значений коэффициентов корреляции.

Далее необходимо сформулировать закон управления линией. Цель управления – обеспечить максимальную эффективность линии за счет оптимизации работы станций и управления буферными емкостями.

Для поддержания непрерывности производственного процесса и оптимальной загрузки

станций вводится механизм адаптивного управления скоростью обработки каждой станции в зависимости от состояния буферов.

Скорость обработки на станции i задается как

$$R_i(t) = R_{\text{ном},i} u_i(t),$$

где $R_{\text{ном},i}$ – номинальная скорость обработки на станции i ; $u_i(t)$ – управляющий коэффициент станции i в момент времени t , $0 \leq u_i(t) \leq 1$.

Управляющий коэффициент $u_i(t)$ определяется на основе уровня заполнения буферов:

$$u_i = \begin{cases} 1, & \text{если } S_i(t) = \text{работает и } b_i(t) < B_{i,\text{крит}}, \\ K_{\text{замедл}}, & \text{если } S_i(t) = \text{работает и } b_i(t) \geq B_{i,\text{крит}}, \\ 0, & \text{если } S_i(t) = \text{простой,} \end{cases}$$

где $S_i(t)$ – состояние станции i в момент времени t (работает или простой); $b_i(t)$ – уровень заполнения буфера i в момент времени t ; $B_{i,\text{крит}}$ – критический уровень заполнения буфера i , при котором необходимо замедлить работу предыдущей станции; $K_{\text{замедл}}$ – коэффициент замедления скорости, $0 < K_{\text{замедл}} < 1$.

Здесь замедление скорости позволяет избежать переполнения буфера и остановки предыдущей станции.

При управлении буферными емкостями основная цель – определить оптимальную вместимость буферов B_i , чтобы минимизировать вероятность остановок станций из-за переполнения или опустошения буферов, при этом не увеличивая излишне затраты на их содержание.

Подходом в данном случае может служить оптимизация B_i за счет моделирования различных сценариев работы линии и определения такой емкости буфера, при которой достигается баланс между эффективностью и затратами. Критерии оптимальности должны включать минимизацию общей вероятности простоев или максимизацию коэффициента общей эффективности оборудования (ОЭО).

При управлении профилактическим обслуживанием целью является снижение количества внеплановых простоев за счет своевременного проведения профилактических работ. Здесь необходимо применять модель отказов и восстановлений, где интенсивность отказов λ_i может быть снижена путем планирования профилактического обслуживания, а интенсивность восстановлений γ_i может быть увеличена за счет

улучшения процессов ремонта и обучения персонала.

Стратегией в данном случае может являться разработка графика профилактического обслуживания на основе статистических данных о частоте отказов и использование методов прогнозирующего обслуживания с применением данных о состоянии оборудования [20, 21].

В контексте рассматриваемой модели роботизированной линии розлива производственный баланс означает состояние, в котором все станции производственной линии функционируют согласованно, без простоев и нарушений.

Производственный баланс определяется тремя основными условиями:

1) все станции находятся в рабочем состоянии, т. е. нет остановок из-за отказов оборудования;

2) уровень заполнения буферов между станциями находится в пределах допустимого диапазона, т. е. буферы не переполнены и не пусты;

3) производительность на каждой станции остается согласованной с производительностью всей линии.

Накопительная степень производственного баланса представляет собой долю времени, в течение которого производственная линия находится в состоянии баланса.

Обозначим накопительную степень производственного баланса как $S_{\text{нак}}(t)$, где t – текущий временной шаг моделирования.

На каждой операции необходимо проверять выполнение условий баланса (все станции работают, буферы корректно заполнены). Если баланс достигается на шаге t , то $S_{\text{нак}}(t) = 1$, в противном случае $S_{\text{нак}}(t) = 0$.

Тогда формула для накопительной степени баланса будет иметь вид

$$S_{\text{нак}}(t) = \frac{\sum_{t'=1}^t S(t')}{t},$$

где $S(t') = 1$ при выполнении условий баланса на временном шаге t' , в противном случае $S(t') = 0$.

На основании вышеизложенного можно сформулировать ряд гипотез, которые подтверждаются предлагаемой имитационной моделью.

1. Увеличение емкости буферов B_i приводит к снижению вероятности остановки линии и повышению общей эффективности. Для этого необходимо провести моделирование с различными

значениями B_i и оценить влияние на ОЭО. До определенного предела увеличение B_i снижает количество остановок, но после достижения оптимального значения эффект становится незначительным.

2. Планирование и распределение ресурсов на основе анализа данных о частоте отказов позволяет более эффективно использовать производственные мощности и минимизировать простои, что способствует повышению производительности линии и стабильности выпускаемой продукции.

Моделирование и анализ результатов

Моделирование производственной линии розлива проводилось на основе разработанной имитационной модели, реализованной с использованием языка программирования Python. В качестве инструментария были применены библиотеки NumPy и Matplotlib для работы с массивами данных и построения графиков, что позволило эффективно моделировать производственный процесс и визуализировать полученные результаты.

Цель моделирования – изучение оценки эффективности роботизированной линии розлива,

состоящей из пяти последовательно соединенных станций, каждая из которых выполняет определенные операции. Данные операции включали обработку изделий в стеклянных бутылках объемом 0,5 л. Особое внимание уделялось параметрам времени обработки станций, вероятностям отказов и восстановления оборудования, а также емкостям буферов между станциями.

Общая продолжительность моделирования составила 10000 с, а временной шаг был выбран в 1 с, чтобы достичь достаточной детализации динамики производственного процесса. Это позволило определить производительность каждой станции, а также выявить закономерности в работе буферов и эффект влияния отказов оборудования на производственную эффективность.

На первом этапе задавались все необходимые параметры моделирования: среднее время обработки станций (t_i), интенсивности отказов (λ_i), интенсивности восстановления (γ_i), емкости буферов между станциями (B_i), а также параметры качества продукции (μ_{Qi} и σ_{Qi}). Состояние каждой станции (работает или простаивает) и текущий уровень заполнения буферов инициализировались согласно начальным условиям (табл. 1).

Таблица 1. Входные параметры для моделирования

Table 1. Input parameters for simulation modeling

№ станции	Среднее время обработки, t_i , с	σ_{ti} , с	λ_i , 1/с	γ_i , 1/с	B_i , шт.	Кол-во произведенной продукции, шт.	Кол-во отказов, раз	Время простоя, с
Станция 1	1,0	0,1	0,001	0,01	100	1682	12	4155
Станция 2	0,8	0,08	0,0015	0,015	150	1745	20	4155
Станция 3	0,9	0,09	0,002	0,012	120	1748	18	4155
Станция 4	0,7	0,07	0,0012	0,018	130	1760	10	4155
Станция 5	1,1	0,11	0,0018	0,02	–	1764	16	4155

В течение каждого временного шага (1 с) проверялось состояние каждой станции. Если станция находилась в рабочем состоянии, то моделировалось случайное время до отказа, и производилась обработка изделий. В случае наступления отказа станция переходила в состояние простоя, и начинался процесс восстановления, описываемый случайным временем восстановления.

Между каждой парой станций располагались буферы, которые могли заполняться и опустошаться в зависимости от работы станций. В случае переполнения буфера предыдущая станция переходила в состояние простоя до освобождения буфера. В случае опустошения буфера последующая станция простаивала до появления новой продукции.

Для моделирования отказов оборудования использовалось экспоненциальное распределение

с интенсивностью отказов для каждой станции i . На каждом временном шаге моделировалось время до следующего отказа для каждой станции как случайная величина $T_{отказ} \approx \text{Exp}(\lambda_i)$.

Если текущее время моделирования превышало значение $T_{отказ}$ для определенной станции, происходил отказ, и станция переводилась в состояние простоя. Восстановление также моделировалось с помощью экспоненциального распределения.

Этот процесс позволяет создать переходные состояния, при которых станции периодически останавливаются и запускаются заново, что вносит колебания в производственный баланс.

Уровень заполнения буфера между станциями на каждом временном шаге обновлялся в зависимости от производительности предыдущей и следующей станции. Производительность

ность каждой станции моделировалась как случайная величина, подчиняющаяся нормальному распределению.

После обработки на последней станции каждой единице продукции присваивался показатель качества, определяемый случайной величиной с нормальным распределением и параметрами μ_{Q_i} и σ_{Q_i} . Продукция считалась годной, если ее качество находилось в заданном диапазоне $[Q_{\min}, Q_{\max}]$.

По завершении моделирования рассчитывались эксплуатационные коэффициенты: коэффициент общей эффективности оборудования, доступность оборудования, производительность и качество продукции Q .

Результаты моделирования представлены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты моделирования

Table 2. Simulation modeling results

Коэффициент ОЭО	Доступность	Производительность	Качество, Q
0,2950	0,5840	0,6591	0,7664

На рисунке 1 представлена динамика уровня заполнения буферов производственной линии во времени. Каждый буфер, находящийся между станциями, отображается в отдельной цветовой линии, что позволяет провести анализ их поведения на протяжении всего процесса моделирования.

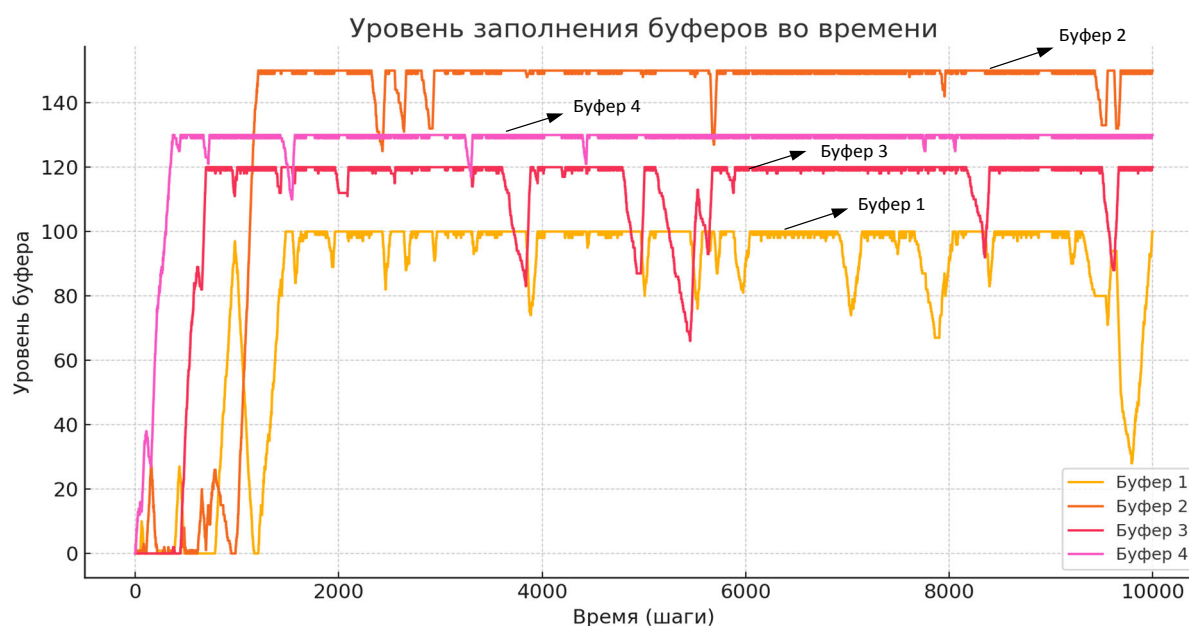


Рис. 1. Имитируемые уровни заполнения буферов

Fig. 1. Simulated buffer fill levels

Буфер 1 быстро заполняется, но регулярно опустошается, указывая на перебои работы или различие производительности станций. Буфер 2 более стабилен, но иногда достигает критических уровней, отражая неравномерность работы. Буфер 3 в основном стабильно заполнен, что предполагает согласованную работу станций, однако резкие падения указывают на возможные отказы оборудования. Буфер 4 поддерживает высокий уровень заполнения, отражая стабильность работы последней станции, хотя небольшие падения свидетельствуют о возможных временных остановках.

На рисунке 2 показана динамика работы станций производственной линии, где 1 означает работающее состояние, а 0 – простой. На-

чальные этапы моделирования показывают стабильную работу станций, но со временем участились простои, особенно на последних станциях (4 и 5), что указывает на зависимость их работы от предыдущих станций и наполнения буферов. Простои становятся более частыми из-за отказов оборудования и разницы в производительности между станциями. Основное наблюдение заключается в том, что последняя станция имеет наибольшие простои, ограничивая общую эффективность линии, что указывает на необходимость оптимизации емкости буферов и производительности станций.

Рисунок 3 иллюстрирует влияние емкости буфера на коэффициент общей эффективности оборудования.

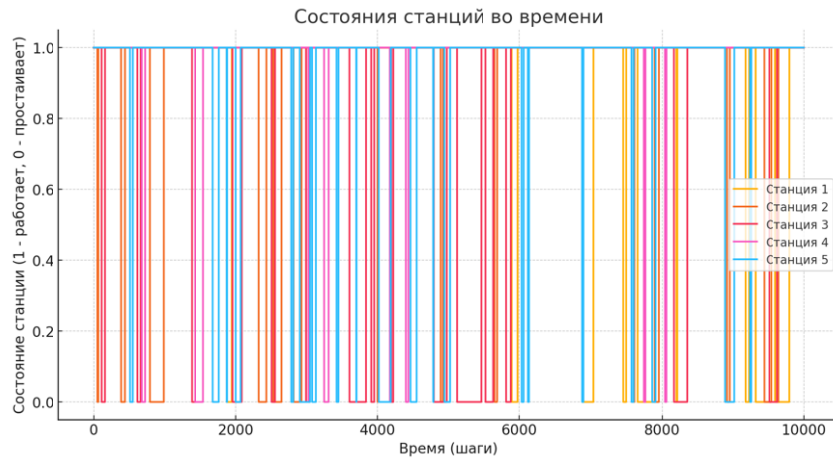


Рис. 2. Имитация состояния станций

Fig. 2. Simulation of station conditions



Рис. 3. Полученная в ходе имитационного моделирования зависимость влияния емкости буфера на коэффициент ОЭО

Fig. 3. Simulation-derived dependence of buffer capacity on OEE

При увеличении емкости до 100 ед. наблюдается рост ОЭО, достигая оптимума, что свидетельствует об эффективном балансе загрузки станций. Однако дальнейшее увеличение емкости до 150 приводит к снижению эффективности, вероятно, из-за чрезмерного накопления продукции и связанных с этим простоев. При емкости 200 ОЭО вновь повышается, что может указывать на стабилизацию производственного процесса и лучшее управление потоком изделий. Таким образом, выбор оптимальной емкости буфера играет ключевую роль в повышении эффективности производственной линии.

На рисунке 4 представлена полученная корреляция между эксплуатационными параметрами: доступностью, производительностью и ка-

чеством. Взаимосвязь между доступностью и производительностью (крестик в квадрате) слабая, что указывает на то, что изменение доступности не сильно влияет на производительность системы. В то же время доступность и качество (крестик в круге) имеют высокую корреляцию, что свидетельствует о том, что увеличение доступности способствует росту качества продукции. Корреляция между производительностью и качеством (крестик) также высокая, что указывает на взаимное влияние этих параметров. В целом наиболее значимым фактором является зависимость качества от доступности и производительности.

На рисунке 5 показана зависимость коэффициента качества продукции Q от накопительной

степени производственного баланса $S_{\text{нак}}(t)$. Видно, что по мере увеличения $S_{\text{нак}}(t)$, то есть по мере повышения стабильности работы производственной линии, значение Q также растет, приближаясь к 1. Таким образом, высокий уро-

вень производственного баланса, характеризующийся минимальными простоями и поддержанием буферов в допустимых пределах, коррелирует с повышением вероятности соответствия продукции установленным стандартам качества.

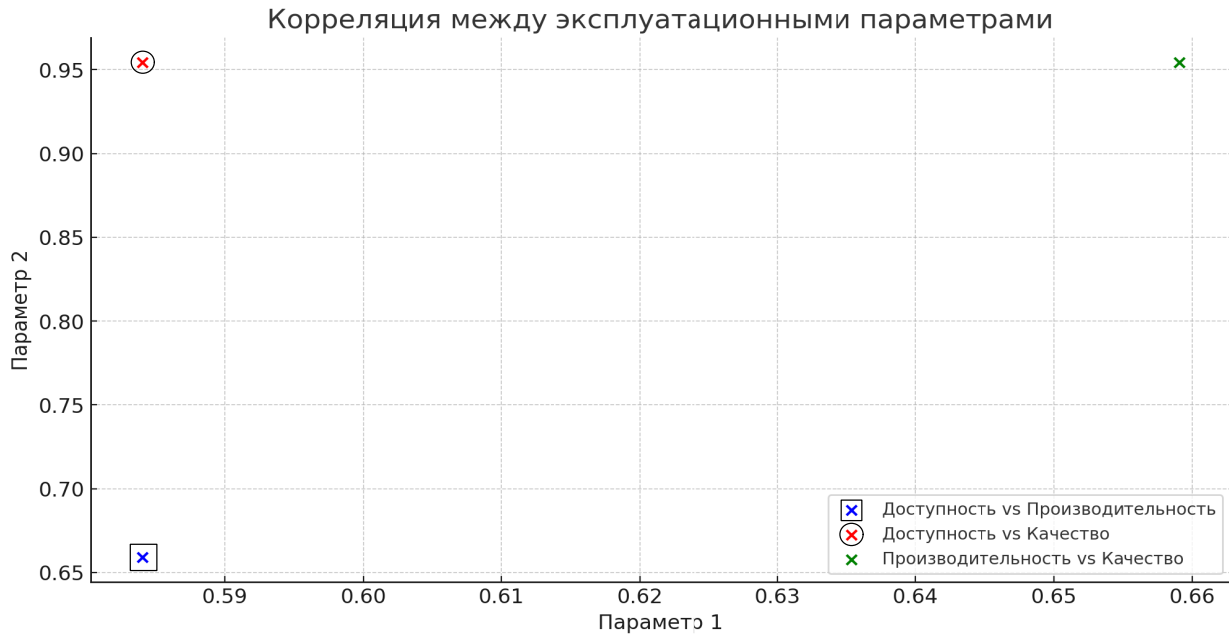


Рис. 4. Полученная в ходе имитационного моделирования корреляция между эксплуатационными параметрами: доступностью, производительностью и качеством

Fig. 4. Correlation between operational parameters: availability, productivity and quality, obtained through simulation modeling

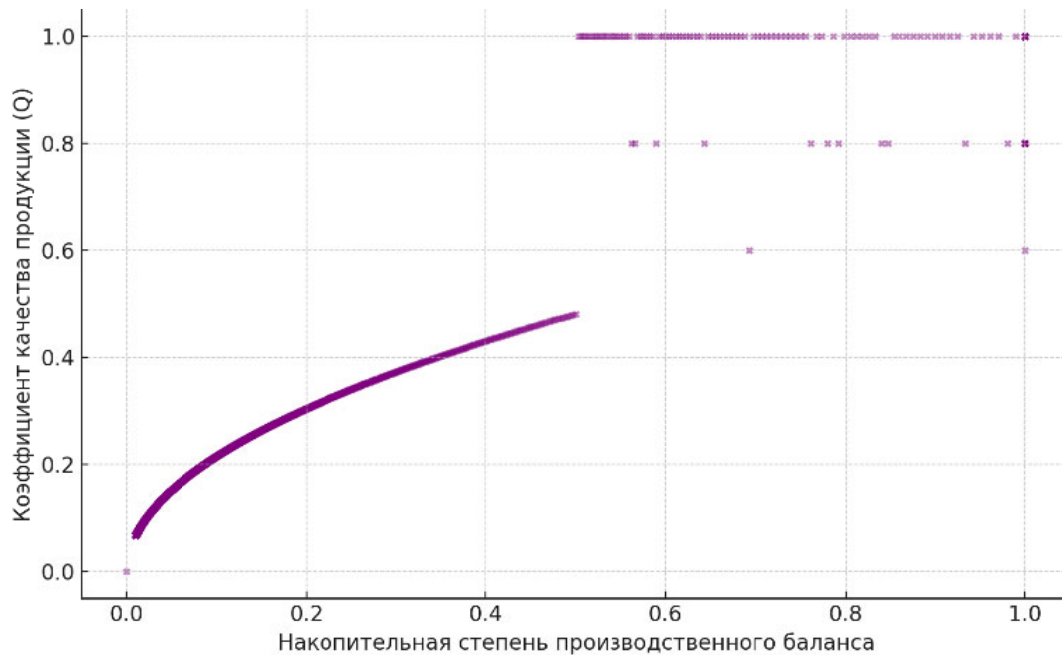


Рис. 5. Зависимость коэффициента качества продукции Q от накопительной степени производственного баланса

Fig. 5. Dependence of the product quality coefficient Q on the cumulative degree of production balance

График на рисунке 6 показывает, как изменяется коэффициент $K_{\text{согл}}$ с ростом накопительной степени баланса, где высокий уровень $K_{\text{согл}}$ указывает на минимальную вариативность качества, что свидетельствует о стабильности производственного процесса. Зависимость от накопи-

тельного баланса позволяет сделать вывод о том, что при достижении высоких уровней баланса (когда $S_{\text{нак}}(t)$ близка к 1) коэффициент согласованности качества также достигает своих высоких значений.

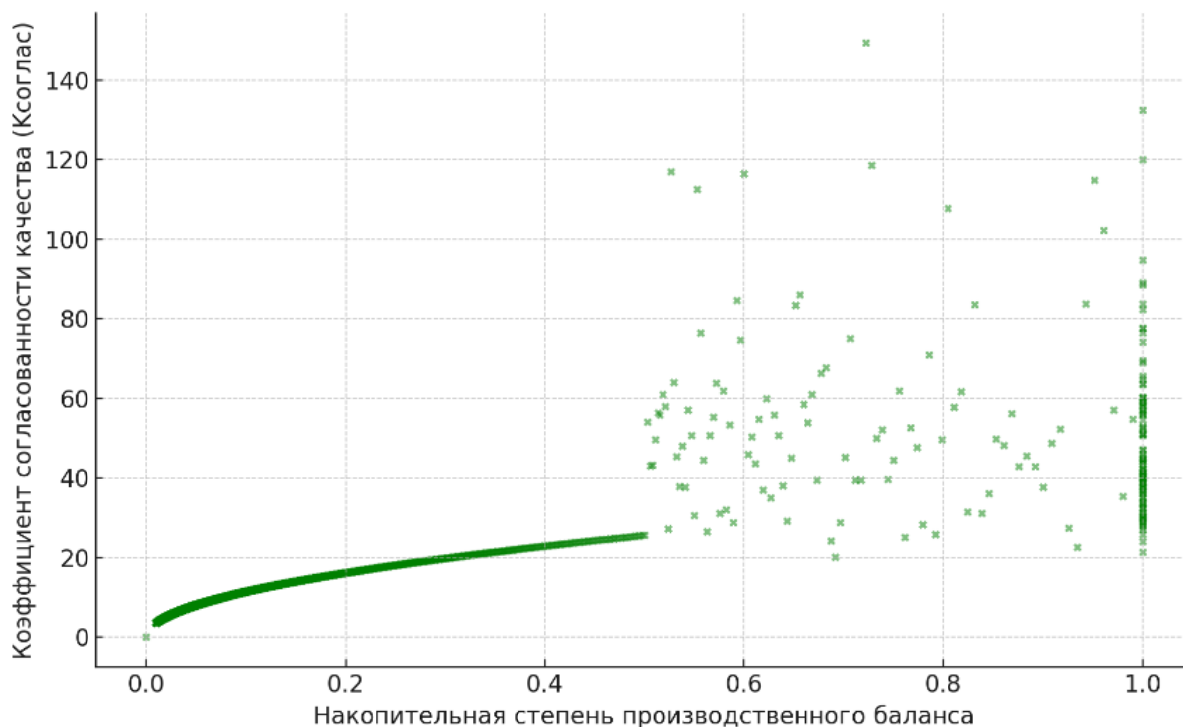


Рис. 6. Зависимость коэффициента согласованности качества от накопительной степени производственного баланса

Fig. 6. Dependence of the quality consistency coefficient on the cumulative degree of production balance

Разброс значений коэффициента $K_{\text{согл}}$ в области накопительной степени производственного баланса от 0,5 до 0,9 обусловлен влиянием случайных факторов и вариативностью условий работы производственной линии в процессе моделирования.

Выводы

1. Разработана имитационная модель роботизированной линии розлива газированных напитков, основанная на стохастических методах и дифференциальных уравнениях.

2. Модель учитывает динамику работы пяти последовательно соединенных станций, взаимодействующих через буферные емкости ограниченной вместимости, что позволяет анализировать эффекты неравномерности работы оборудования и их влияние на производительность линии.

3. Ключевые показатели эффективности модели включают коэффициент общей эффективности оборудования, доступность оборудова-

ния, производительность линии и качество продукции. При этом введение коэффициента согласованности качества предоставляет количественную оценку стабильности и однородности качества продукции, что является важным инструментом для управления качеством.

4. Корреляционный анализ эксплуатационных параметров показал взаимосвязь между производительностью и качеством продукции в условиях стабильно поддерживаемого производственного баланса. Полученные результаты показывают, что при стабильной работе и минимальных простоях показатели производительности и качества демонстрируют положительную динамику, однако методология может требовать уточнений для отдельных производственных условий.

5. Практическая значимость работы заключается в возможности прямого применения модели для оптимизации существующих производственных линий. Предприятия могут использо-

вать результаты моделирования для выбора оптимальных параметров буферных емкостей, планирования профилактических работ и настройки режимов работы оборудования.

6. Преимущества предлагаемой модели заключаются в способности воспроизводить функционирование производственной линии с учетом случайных факторов, влияющих на производительность линии и рассматриваемые коэффициенты.

7. Использование стохастических методов и дифференциальных уравнений позволяет анализировать влияние различных параметров, таких как емкость буферов, интенсивность отказов и восстановлений, на ключевые показатели производительности.

8. Подтверждена возможность использования имитационных моделей для повышения эффективности роботизированной линии розлива. Рекомендуется через данные модели оптимизировать емкости буферов, внедрять адаптивные алгоритмы управления скоростью станций и планировать профилактическое обслуживание. Эти меры способствуют сокращению простоев и увеличению производительности линии, что имеет значение для промышленного повышения эффективности производственных процессов.

Библиографические ссылки

1. Тарасова И. А., Дробитько А. В. Усовершенствование системы автоматического управления технологическим процессом в производстве пищевой промышленности // Проблемы искусственного интеллекта. 2018. Т. 3, № 10. С. 112–121.
2. Шишков И. А. Управление роботами в производственных линиях // Наука и мировоззрение. 2024. № 20.
3. Солодилова Н. А., Уба С. С., Емельянов А. А. Системный подход при использовании цифровых технологий в машиностроении // Системный анализ в проектировании и управлении. 2024. Т. XXVII, № 1. С. 358–364. DOI: 10.18720/SPBPU/2/id24-60
4. Компьютерная модель и комплектация линии по производству безалкогольного напитка функционального назначения / Л. В. Гнетько, М. М. Удычак, Б. Б. Сиюхова, С. А. Гишева // Новые технологии. 2020. № 6. С. 20–27.
5. Ramírez-Granados M., Hernández J.E., Lyons A.C. (2014) A discrete-event simulation model for supporting the first-tier supplier decision-making in a UK's automotive industry. *Journal of Applied Research and Technology*, vol. 12, no. 5, pp. 860-870. DOI: 10.1016/S1665-6423(14)70592-9
6. Velumani S., Tang H. (2017) Operations Status and Bottleneck Analysis and Improvement of a Batch Process Manufacturing Line Using Discrete Event Simulation. *Procedia Manufacturing*, no. 10, pp. 100-111. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.07.033
7. Zhao J., Zou F., Cao J., Cao Y. (2023). Modeling and Simulation Optimization of the Robotic Production Line of Prefabricated Building: 42nd Chinese Control Conference, 7044-7050. DOI: 10.23919/CCC58697.2023.10241106
8. Kassoul K., Cheikhrouhou N., Zufferey N. (2024) Simultaneous allocation of buffer capacities and service times in unreliable production lines. *International Journal of Production Research*, vol. 62, no. 3, pp. 644-664.
9. Kassoul K., Cheikhrouhou N., Zufferey N. (2021) Buffer allocation design for unreliable production lines using genetic algorithm and finite perturbation analysis. *International Journal of Production Research*, vol. 59, no. 20, pp. 3001-3017. DOI: 10.1080/00207543.2021.1909169
10. Wu C.-W., Lee A.H.I., Huang Y.-S. (2021) Developing a skip-lot sampling scheme by variables inspection using repetitive sampling as a reference plan. *International Journal of Production Research*, vol. 59, no. 21, pp. 3018-3030. DOI: 10.1080/00207543.2021.1909768
11. Wang B., Yuan L., Yu X., Ou L. (2020). Construction and Optimization of Digital Twin Model for Hardware Production Line: 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 4756-4761 [Electronic resource]. Available at: <https://doi.org/10.1109/IECON43393.2020.9254967> (accessed: 07.10.2024).
12. Zhang Y. (2022). Layout design and optimization of industrial robot automated production line based on genetic algorithm. *J. Comput. Methods Sci. Eng.*, 23, 469-484 [Electronic resource]. Available at: <https://doi.org/10.3233/jcm-226557> (accessed: 07.10.2024).
13. Дююн И. А., Чуев К. В. Оценка эффективности работы гибких производственных систем и роботизированных комплексов с использованием имитационного моделирования // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. 2021. № 4. С. 91–100. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-4-91-100
14. Имитационное моделирование производственных процессов различных типов машиностроительных производств / С. Н. Григорьев, В. А. Долгов, П. А. Никишечкин, С. С. Ивашин, Н. В. Долгов // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2022. № 3 (142). С. 84–99.
15. Система имитационного моделирования PlantTwin как инструмент верификации производственных планов и поддержки принятия решений для повышения эффективности производства / П. А. Никишечкин, С. С. Ивашин, В. Е. Черненко [и др.] // Вестник машиностроения. 2021. № 3. С. 80–85.
16. Григорьев С. Н., Долгов В. А., Рахмилевич Е. Г. Метод оценки производственной технологичности изделий на основе применения семантических моделей в условиях цифрового производства // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2020. № 12. С. 16–25.
17. Шерстнева А. А. Анализ и прогнозирование параметров авторегрессионного процесса p -го по-

рядка // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2020. Т. 23, № 4. С. 77–84. DOI: 10.22213/2413-1172-2020-4-77-84

18. Сусарев С. В. Модели оценки эффективности технического обслуживания роботизированных транспортных средств // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2020. Т. 28, № 4 (68), С. 62–76.

19. Гончаренко С. Н. Моделирование общей эффективности оборудования на основе анализа технологических маршрутов и потерь рабочего времени // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 3. С. 271–280.

20. Абрамова И. Г. Классификация затрат/потерь времени работы технологического оборудования // Sciences of Europe, 2019, no. 39-1 (39), pp. 28-36.

21. Мартиросян А. Т. Показатель эффективности обслуживания оборудования в системе ключевых показателей производительности // Вестник евразийской науки. 2017. Т. 9, № 6 (43). С. 144.

References

1. Tarasova I.A., Drobitko A.V. (2018) [Improvement of the automatic control system of the technological process in the food industry]. *Problemy iskusstvennogo intellekta*, vol. 3, no. 10, pp. 112-121 (in Russ.).

2. Shishkov I.A. (2024) [Control of robots in production lines]. *Nauka i mirovozzrenie*, no. 20 (in Russ.).

3. Solodilova N.A., Uba S.S., Yemyel'yanov A.A. (2024) [System approach to the use of digital technologies in mechanical engineering]. *Sistemnyy analiz v proektirovanii i upravlenii*, vol. 27, no. 1, pp. 358-364. DOI: 10.18720/SPBPU/2/id24-60 (in Russ.).

4. Gnet'ko L., Udychak M.M., Siiukhov B.B., Gishcheva S.A. (2020) [Computer model and configuration of the production line for a non-alcoholic functional beverage]. *Novye tehnologii*, no. 6, pp. 20-27 (in Russ.).

5. Ramirez-Granados M., Hernández J.E., Lyons A.C. (2014) A discrete-event simulation model for supporting the first-tier supplier decision-making in a UK's automotive industry. *Journal of Applied Research and Technology*, vol. 12, no. 5, pp. 860-870. DOI: 10.1016/S1665-6423(14)70592-9

6. Velumani S., Tang H. (2017) Operations Status and Bottleneck Analysis and Improvement of a Batch Process Manufacturing Line Using Discrete Event Simulation. *Procedia Manufacturing*, no. 10, pp. 100-111. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.07.033

7. Zhao J., Zou F., Cao J., Cao Y. (2023). Modeling and Simulation Optimization of the Robotic Production Line of Prefabricated Building: 42nd Chinese Control Conference, 7044-7050. DOI: 10.23919/CCC58697.2023.10241106

8. Kassoul K., Cheikhrouhou N., Zufferey N. (2024) Simultaneous allocation of buffer capacities and service times in unreliable production lines. *International Journal of Production Research*, vol. 62, no. 3, pp. 644-664.

9. Kassoul K., Cheikhrouhou N., Zufferey N. (2021) Buffer allocation design for unreliable production lines

using genetic algorithm and finite perturbation analysis. *International Journal of Production Research*, vol. 59, no. 20, pp. 3001-3017. DOI: 10.1080/00207543.2021.1909169

10. Wu C.-W., Lee A.H.I., Huang Y.-S. (2021) Developing a skip-lot sampling scheme by variables inspection using repetitive sampling as a reference plan. *International Journal of Production Research*, vol. 59, no. 21, pp. 3018-3030. DOI: 10.1080/00207543.2021.1909768

11. Wang B., Yuan L., Yu X., Ou L. (2020). Construction and Optimization of Digital Twin Model for Hardware Production Line: 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 4756-4761 [Electronic resource]. Available at: <https://doi.org/10.1109/IECON43393.2020.9254967> (accessed: 07.10.2024).

12. Zhang Y. (2022). Layout design and optimization of industrial robot automated production line based on genetic algorithm. *J. Comput. Methods Sci. Eng.*, 23, 469-484 [Electronic resource]. Available at: <https://doi.org/10.3233/jcm-226557> (accessed: 07.10.2024).

13. Duyun I.A., Chuev K.V. (2021) [Evaluation of the efficiency of flexible production systems and robotic complexes using simulation modeling]. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta im. V. G. Shuhova*, no. 4, pp. 91-100. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-4-91-100 (in Russ.).

14. Grigoryev S.N., Dolgov V.A., Nikishechkin P.A., Ivashin S.S., Dolgov N.V. (2022) [Simulation modeling of production processes of various types of mechanical engineering productions]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta im. N. Je. Bauman. Seriya: Mashinostroenie*, no. 3, pp. 84-99 (in Russ.).

15. Nikishechkin P.A., Ivashin S.S., Chernenko V.E. (2021) [Simulation modeling system PlantTwin as a tool for verifying production plans and supporting decision-making to improve production efficiency]. *Vestnik mashinostroeniya*, no. 3, pp. 80-85 (in Russ.).

16. Grigoryev S.N., Dolgov V.A., Rakhmilievich E.G. (2020) [Method of evaluating the production technological efficiency of products based on the use of semantic models in the conditions of digital production]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie*, no. 12, pp. 16-25 (in Russ.).

17. Sherstneva A.A. (2020) [Analysis and forecasting of parameters of autoregressive process of p-th order]. *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova*, vol. 23, no. 4, pp. 77-84 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2020-4-77-84

18. Susarev S.V. (2020) [Models for evaluating the efficiency of technical maintenance of robotic transport vehicles]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta. Seriya: Tehnicheskie nauki*, vol. 28, no. 4, pp. 62-76 (in Russ.).

19. Goncharenko S.N. (2022) [Modeling the overall equipment efficiency based on the analysis of technological routes and work time losses]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tehnicheskie nauki*, no. 3, pp. 271-280 (in Russ.).

20. Abramova I.G. (2019) [Classification of costs / time losses in the operation of technological equipment]. *Sciences of Europe*, no. 39-1, pp. 28-36 (in Russ.).

21. Martirosyan A.T. (2017) [Indicator of equipment maintenance efficiency in the system of key performance indicators]. *Vestnik evraziyskoy nauki*, vol. 9, no. 6, p. 144 (in Russ.).

Robotized Bottling Line Efficiency Evaluation Based on Simulation Modeling and Operational Performance Metrics

E.S. Kvas, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia

V.P. Kuzmenko, PhD in Engineering, Associate Professor, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia

This study presents a simulation model for assessing the production stability of a robotized bottling line for carbonated beverages into 0.5-liter glass bottles. The goal of the research was to develop a simulation model to analyze factors affecting line operation stability and production balance. The model considers the stochastic characteristics of processing time at each station, the probability of equipment failures and repairs, and the dynamics of buffer filling, enabling the assessment and maintenance of line operation stability. During the simulation, hypotheses were explored regarding the impact of buffer capacity on the overall equipment effectiveness (OEE) and resource planning processes based on failure frequency data. Simulation results demonstrated that there is an optimal buffer capacity at which line efficiency is maximum. The developed simulation model provides an effective tool for analyzing and optimizing the buffer capacity management process within a bottling line. The scientific novelty of the study lies in the integration of stochastic methods and production process dynamics with the probability of quality indicator variation at each stage. The practical significance of the work lies in the model's direct applicability for optimizing production lines and enhancing their market competitiveness.

Keywords: simulation modeling, robotic bottling line, performance optimization, production process management, overall equipment effectiveness.

Получено 11.10.2024

Образец цитирования

Квас Е. С., Кузьменко В. П. Оценка эффективности роботизированных линий розлива с использованием имитационного моделирования и эксплуатационных коэффициентов // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2024. Т. 27, № 4. С. 31–44. DOI: 10.22213/2413-1172-2024-4-31-44

For Citation

Kvas E.S., Kuzmenko V.P. (2024) [Robotized Bottling Line Efficiency Evaluation Based on Simulation Modeling and Operational Performance Metrics]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 27, no. 4, pp. 31-44 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2024-4-31-44