

ОСОБЕННОСТИ СОЗДАНИЯ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО КОРМЛЕНИЯ РЫБ В ПРОГРАММНОМ ОБЕСПЕЧЕНИИ ANYLOGIC



А. А. Черба, студент 2-го курса магистратуры
E-mail: ar.cherba@yandex.ru
ФГБОУ ВО «Калининградский государственный
технический университет»

Н. С. Будченко, кандидат технических наук, доцент
E-mail: natalya.budchenko@klgtu.ru
ФГБОУ ВО «Калининградский государственный
технический университет»

Н. А. Долгий, кандидат технических наук, доцент
E-mail: dolgi@klgtu.ru
ФГБОУ ВО «Калининградский государственный
технический университет»

В работе рассматривается создание имитационной модели системы централизованного кормления рыбы в среде AnyLogic. Модель построена с использованием гибридного подхода, сочетающего дискретно-событийное и агентное моделирование. Проведен сравнительный анализ исходной системы ручного кормления и модернизированной централизованной системы. Выполнена валидация модели путем варьирования базовых параметров технологического процесса. Полученные результаты демонстрируют существенное снижение трудозатрат персонала при сохранении эффективности кормления.

Ключевые слова: имитационное моделирование, цифровой двойник, агентное моделирование, дискретно-событийное моделирование, гибридные модели, производственные модели, AnyLogic.

ВВЕДЕНИЕ

Современные производственные системы требуют повышения эффективности при одновременном снижении трудозатрат. Имитационное моделирование является одним из эффективных инструментов анализа и оптимизации технологических процессов [1]. Построение имитационной модели производства в AnyLogic позволяет структурированно отобразить ход производственных процессов, прогнозировать качество выпускаемой продукции, а также оценить показатели работы производственной системы в целом, определить ее слабые стороны и оптимизировать ход технологических процессов [2–4]. Использование AnyLogic для создания имитационной модели системы централизованного кормления рыб позволяет прогнозировать рост рыбы, поведение стаи и распределение корма, помогает перевести управление системой централизованного кормления рыбы с интуитивного уровня на научно обоснованный, что критически важно, т. к. затраты на корма могут составлять до 60 % от общей стоимости производства [5, 6].

Особую актуальность приобретает создание цифровых двойников технологических процессов. Это позволяет не только воспроизводить текущую работу системы, но и проводить эксперименты с параметрами системы, выявляя узкие места и оценивая последствия измене-

ний. В данной работе рассматривается система кормления рыбы, модернизированная от ручного способа к централизованному. Основное внимание уделено построению имитационной модели и анализу ее поведения.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования является система кормления рыбы, включающая 32 бассейна: 16 мальковых и 16 смолтовых.

В настоящее время кормление осуществляется ручным способом: операторы доставляют мешки корма весом 25 кг непосредственно к бассейнам. На каждый бассейн приходится до 20 мешков в день. В модернизированной системе реализована автоматизированная централизованная схема, в которой корм доставляется операторами в общий предбункер. Из предбункера корм перемещается в выбранный силос, а из силосов корм отправляется в связанные с ними бассейны по заданному расписанию. Представленная на рисунке 1 схема автоматизированной централизованной системы кормления рыб соответствует современным высокоавтоматизированным системам кормления, широко используемым в аквакультуре. Система автоматизации централизованного кормления рыбы позволяет снизить время на загрузку корма, является более гибкой, т. к. появляется возможность выбора типа корма и направления его передвижения к силосу. Системой предусмотрено автоматизированное дозирование корма по времени.

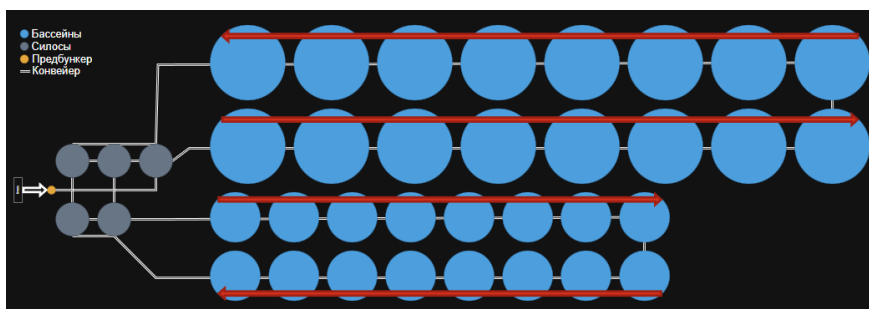


Рисунок 1 – Схема автоматизированной централизованной системы кормления рыб

ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью работы является разработка имитационной модели автоматизированной системы централизованного кормления рыбы и оценка ее эффективности.

Задачи исследования:

- построение цифрового двойника системы в AnyLogic;
- реализация гибридной модели;
- анализ загрузки операторов;
- исследование поведения системы при изменении параметров;
- оценка снижения трудозатрат.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Модель реализована как гибридная, включает дискретно-событийную цепочку и агентную часть. В проекте используются следующие агенты: мешок корма, оператор, корм, предбункер, силос и бассейн. Вводная часть процесса наличия мешков с кормом в системе реализована в главном агенте main в виде дискретной логики (рисунок 2). Агент hold блокирует поток мешков в системе и открывается только при необходимости загрузить силос.

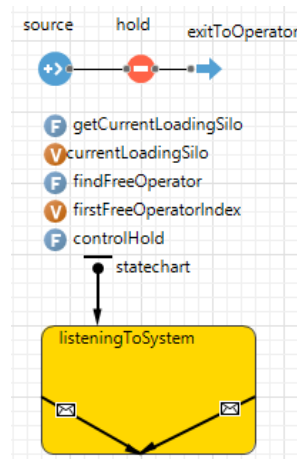


Рисунок 2 – Дискретная логика наличия мешков корма в системе

Агентная модель оператора совмещает конечный автомат и дискретную логику (рисунок 3). Оператор получает сообщение от системы о необходимости переместить мешок с кормом к предбункеру и начинает работу: идет к складу, берет мешок, возвращается обратно, открывает мешок и затем какое-то время отдыхает, после чего он снова готов к работе. Процесс перехода «мешок -> корм» осуществляется при подносе мешков операторами к предбункеру. Это позволяет отделить этап работы операторов от остального технологического процесса.

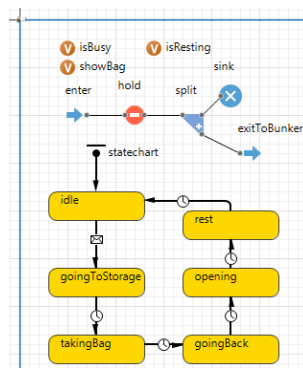


Рисунок 3 – Агентная модель оператора

Агент предбункера осуществляет имитацию прохождения корма через воронку и транспортировку его далее – в агент активного загружаемого силоса. Агент предбункера представлен на рисунке 4.

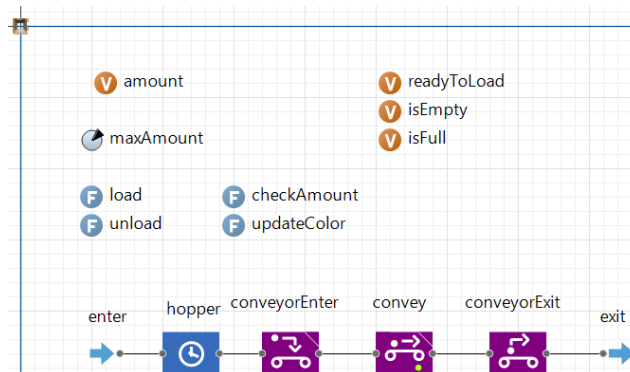


Рисунок 4 – Агентная модель предбункера

Агент силоса имеет дискретную логику для транспортировки корма на конвейерную линию, также находится в состоянии ожидания сообщений от привязанных к нему бассейнов для подсчета необходимого количества корма (рисунок 5).

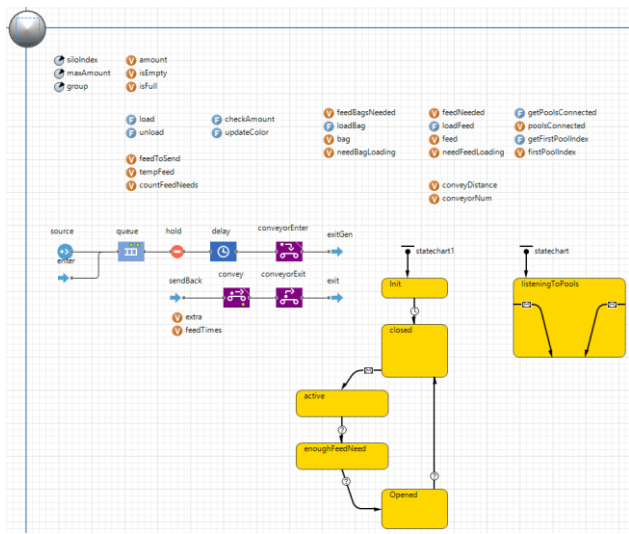


Рисунок 5 – Агентная модель силоса

Агент бассейна представляет собой дискретную логику по транспортировке корма по линии конвейера к привязанному к этому бассейну участку. В зависимости от количества корма бассейн отправляет сообщение о необходимости дополнительного получения корма, см. рисунок 6.

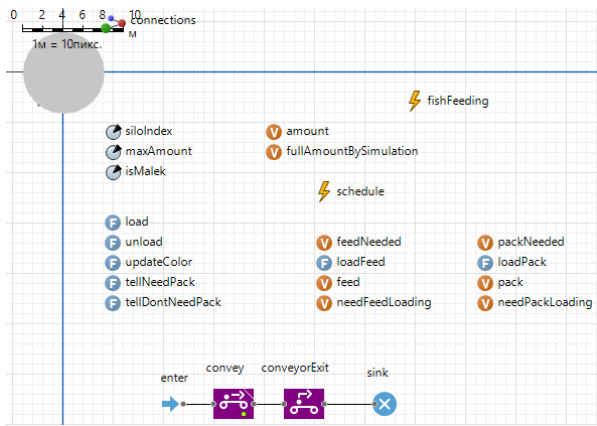


Рисунок 6 – Агентная модель бассейна

Базовые параметры можно задавать в среде AnyLogic, что не совсем удобно для популяции агентов. Вследствие того, что некоторые параметры могут отличаться по какой-либо зависимости, удобнее использовать таблицы MS Excel (рисунок 7) и встроенные в них функции, что позволяет обеспечить гибкость системы.

X	Y	Z	Index	Group	Шар
195	160	0	1	1	60
255	160	0	2	1	
315	160	0	3	1	
195	365	0	4	2	
255	365	0	5	2	

Рисунок 7 – Таблица MS Excel для агентов силосов

Валидация модели проводилась путем изменения массы одной единицы корма (1–5 кг) [7]. На первом этапе изменение параметра приводило к различным результатам, что свидетельствовало о некорректной зависимости элементов системы. После введения динамических зависимостей было установлено, что критическими параметрами является установка размера агента корма и лотка конвейера, соответствующего размеру единицы корма. Также влияние на процесс оказывает время прохождения единицы корма через предбункера и силосы.

В результате модель стала инвариантной к массе единицы корма при фиксированной массе мешка, что подтверждает корректность ее построения. График заполнения силосов представлен на рисунке 8. На графике можно отследить периоды загрузки силосов и выдачи корма бассейнам.

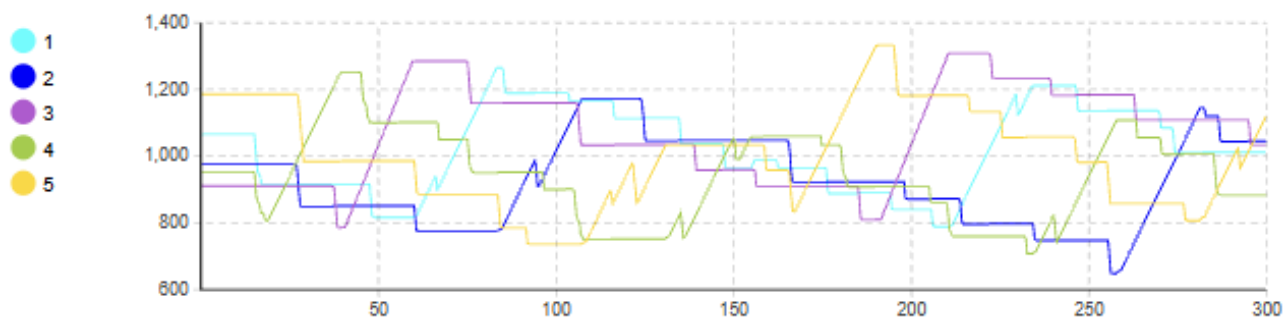


Рисунок 8 – График заполненности силосов за время симуляции

График занятости операторов изображен на рисунке 9.



Рисунок 9 – График занятости операторов

Из графика занятости видно, что:

- среднее время простоя отдельного оператора составляет 14002 с (~3,9 ч);
- среднее время отдыха оператора после переноса мешка – 1226 с;
- среднее время занятости – 2770 с.

Следует отметить, что «простой оператора» – это время, которое оператор может потратить на другие задачи, не относящиеся к переносу корма.

Сравнив графики количества корма в силосах и работы операторов, видно, что для одного цикла загрузки операторы тратят 4–6 мин, а полный цикл загрузки занимает 21–23 мин.

Графики наполненности кормом бассейнов представлены на рисунке 10.

По данному графику можно отследить, насколько часто организована подача корма в разные группы бассейнов с рыбой, а также оценить средний объем кормления каждого бассейна за время симуляции. Оно составляет приблизительно 180 кг на один бассейн за 5 ч, что при пересчете на мешки с кормом – больше 7 мешков на один бассейн за 5 ч.

Программное обеспечение Anylogic также предлагает обширный инструментарий для экспериментов с моделью. Так, в данной среде существует возможность параллельного прогона системы с заданным диапазоном параметров. Сравнение пяти прогонов: от 1 до 5 операторов показано на рисунке 11.

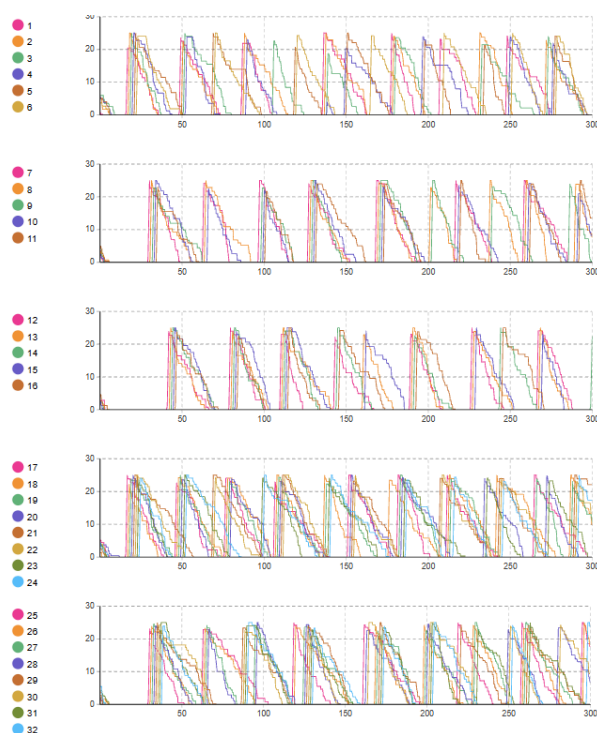


Рисунок 10 – График наполненности кормом бассейнов

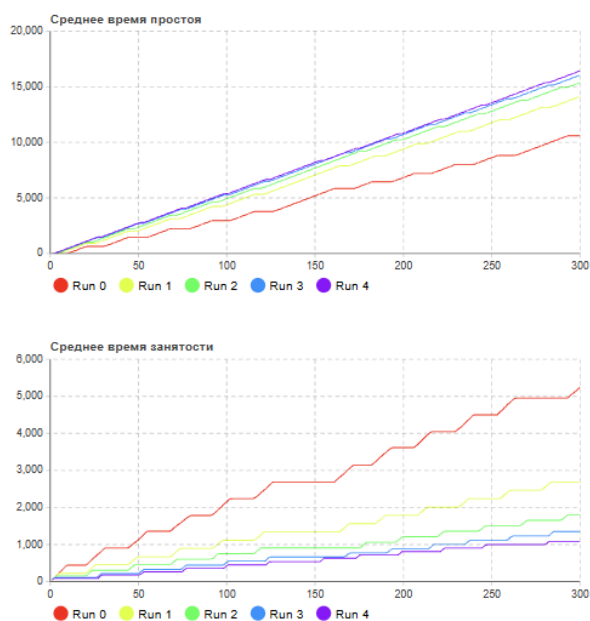


Рисунок 11 – Сравнение пяти прогонов системы для разного количества операторов

По графикам видно, что добавление второго оператора увеличивает среднее время простоя в 1,4 раза, а среднее время работы уменьшается в два раза, при этом добавление последующих работников уже не оказывает сильного влияния на рабочий процесс.

Таким образом, сравнение прогонов имитационной модели показало, что система централизованного кормления рыб позволяет сократить число операторов с четырех до двух, сохраняя эффективность кормления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе разработана имитационная модель системы автоматизированного централизованного кормления рыбы в среде AnyLogic. В результате перехода к разработанной системе

получены следующие выводы: количество операторов следует сократить до двух вместо четырех человек, доля времени простоя достигает примерно 3,9 ч, что свидетельствует о наличии значительного запаса времени для выполнения дополнительных производственных задач.

Построенная модель показала устойчивость к изменению параметров, что подтверждает корректность учета зависимостей технологического процесса. Применение гибридного подхода (дискретно-событийного и агентного моделирования) позволило детально воспроизвести логику потоков корма в системе и работу операторов.

Разработанный цифровой двойник системы централизованного кормления может быть использован для оптимизации работы операторов, настройки параметров оборудования, дальнейшего масштабирования системы.

Внедрение централизованной системы кормления обеспечивает существенное снижение трудозатрат при сохранении требуемых параметров кормления и повышает общую эффективность производственного процесса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Байрамукова, Е. И. Использование методов имитационного моделирования при оценке рисков и оптимизации процессов управления на промышленных предприятиях / Е. И. Байрамукова // Известия Российского государственного педагогического университета им. А. И. Герцена. – 2008. – № 85. – С. 315–320. – EDN JVWMPZ.

2. Фялковский, Е. Е. Использование имитационного моделирования для решения задач реинжиниринга бизнес-процессов в среде моделирования Anylogic / Е. Е. Фялковский // Прикладная математика и фундаментальная информатика. – 2021. – Т. 8, № 1. – С. 67–75. – DOI 10.25206/2311-4908-2021-8-1-67-75. – EDN JBJOYY.

3. Разработка мультиагентной имитационной модели производства мармелада с использованием Anylogic / В. Г. Благовещенский, И. Г. Благовещенский, И. В. Кротов, М. М. Благовещенская // Автоматизированные системы управления биотехнологическими процессами: сборник научных докладов Всероссийской конференции с международным участием (Москва, 11 декабря 2024 г.). – Курск: ЗАО «Университетская книга», 2025. – С. 27–35. – EDN ADHXXD.

4. Сенцова, К. А. Использование компьютерного имитационного моделирования в среде Anylogic при проектировании производственных участков и цехов / К. А. Сенцова // Инновации и информационные технологии в условиях цифровизации экономики: Сборник тезисов III международной научно-практической конференции (Алчевск, 24–25 апреля 2025 г.). – Алчевск: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донбасский государственный технический университет», 2025. – С. 215–217. – EDN VSSSUF.

5. Кузнецова, А. Р. Себестоимость сельскохозяйственной продукции как ключевой фактор повышения эффективности производства / А. Р. Кузнецова, А. А. Аскарова // Международный сельскохозяйственный журнал. – 2020. – № 2. – С. 40–42. – DOI 10.24411/2587-6740-2020-12027. – EDN AWCQBL.

6. Мокшин, К. Ю. Цифровая модель развития популяции рыб вида *Clarias gariepinus* (Африканский клариевый сом) для создания цифрового двойника промышленного рыбоводческого комплекса на базе технологии IoT с возможностью предиктивной аналитики / К. Ю. Мокшин, М. Г. Жабицкий, Ю. А. Андриенко // International Journal of Open Information Technologies. – 2022. – Т. 10, № 8. – С. 68–76. – EDN RYFPRK.

7. Лундаева, К. А. Методы количественной валидации цифрового моделирования в разрезе этапов разработки модели / К. А. Лундаева // Системный анализ в проектировании и управлении: сборник научных трудов XXVII Международной научно-практической конференции: 2-х частях (Санкт-Петербург, 13–14 октября 2023 г.). – Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024. – С. 461–467. – DOI 10.18720/SPBPU/2/id24-75. – EDN KAWVUE.

PICULIARITIES OF CENTRALIZED FISH FEEDING SYSTEM SIMULATION MODEL DEVELOPMENT IN ANYLOGIC SOFTWARE

A. A. Cherba, 2nd-year Master's student
E-mail: ar.cherba@yandex.ru
Kaliningrad State Technical University

N. S. Budchenko, PhD in Engineering
E-mail: natalya.budchenko@klgtu.ru
Kaliningrad State Technical University

N. A. Dolgii, PhD in Engineering
E-mail: dolgi@klgtu.ru
Kaliningrad State Technical University

This article presents the development of centralized fish feeding system simulation model in the AnyLogic environment. The model is based on a hybrid approach combining discrete-event and agent-based simulation methods which allow the representation of both technological processes and system interactions. A comparative analysis of the initial manual feeding system and the modernized centralized feeding system was carried out. Model validation was performed by varying the main parameters of the technological process. The simulation results demonstrate a significant reduction in labor costs while maintaining feeding efficiency and stable production performance. The developed model can be applied to evaluate automated feeding systems in aquaculture enterprises.

Keywords: *simulation modeling, digital twin, agent-based modeling, discrete-event modeling, hybrid models, production systems, AnyLogic.*