УДК 622

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ РАБОТЫ ЭКСКАВАТОРНО-АВТОСАМОСВАЛЬНОГО КОМПЛЕКСА КАРЬЕРА НА ОСНОВЕ GPSS

Апухтин Р.В.
Кузнецов И.С.
Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева
Россия, г. Кемерово

Открытая добыча угля в Российской Федерации составляет 74% от всей добычи этого ресурса. Важной проблемой остается повышение производительности экскаваторно-автосамосвальных комплексов (ЭАК), на которую влияют параметры взаимодействующих машин и внеплановые простои, достигающие до 57% рабочего времени. Это приводит к снижению общей производительности. Современные методы имитационного моделирования позволяют оценить эффективность работы ЭАК, выявить узкие места и оптимизировать параметры работы. Интеграция машинного обучения, в частности нейронных сетей, для анализа результатов моделирования дает возможность предсказывать производительность системы и оптимизировать конфигурацию комплекса без необходимости повторных имитационных экспериментов.

Тезисное описание имитационной модели:

- Цель моделирования — количественная оценка эффективности работы погрузочно-транспортного комплекса, включающего один экскаватор и ограниченное количество автосамосвалов, выполняющих цикл «погрузка — транспортирование — разгрузка — порожний ход».
- Тип модели — дискретно-событийная стохастическая имитационная модель, разработанная в среде GPSS, позволяющая учитывать очереди, занятость ресурсов, стохастические временные задержки и повторяющиеся циклы транспорта.
- Структура модели основана на последовательном прохождении автосамосвалом всех стадий технологического процесса:

1. ожидание в очереди на погрузку;
2. выполнение манёвров в забое;
3. обслуживание экскаватором (процесс погрузки);
4. транспортирование гружёного автомобиля к месту разгрузки;
5. ожидание и манёвры на отвале;
6. разгрузка;
7. порожний ход в сторону забоя.

- Ресурсно-ориентированная структура модели реализована через объекты:

1. *EXCOVATOR* — обслуживающий ресурс с единственной единицей мощности. Данный ресурс соответствует экскаватору в комплексе;

2. *ZABOY* — стояночное место погрузки, обладающее емкостью 1;

3. *OTVAL* — площадка разгрузки, может обладать емкостью до 5;

4. *OCH_ZABOY* и *OCH_OTVAL* – очереди, фиксирующие накопление автосамосвалов перед занятием соответствующих позиций.

- Параметризация модели включает:

1. количество автосамосвалов (*N_AVTO*), закреплённых за экскаватором;

2. коэффициенты работоспособности отдельных операций (манёвры, ход, разгрузка), позволяющие моделировать режимы работы техники и влияния эксплуатационных факторов;

3. распределения длительностей операций, определённые в виде гамма-распределений, что отражает реальную вариативность длительностей технологических процессов в добыче.

- Временные параметры каждой операции задаются индивидуально для каждого автосамосвала через блоки *ASSIGN*, что обеспечивает неоднородность штата транспорта и снижает предопределенность цикла.
- Особенность модели — она реализует непрерывный замкнутый цикл движения каждого автосамосвала: по завершении рейса он автоматически возвращается к началу процесса, что даёт возможность моделировать систему в квазистационарном состоянии в течение длительного горизонта.
- Логика событий и прерываний реализована через блоки *MARK*, *ADVANCE*, *SEIZE/RELEASE*, что позволяет получать точные замеры длительностей каждой стадии, а также учитывать конкуренцию за ограниченные ресурсы.
- Имитируемые эффекты включают:

1. очереди в забое и на отвале как потенциальные узкие места;

2. влияние количества техники на загрузку экскаватора и время простоя самосвалов;

3. вариативность длительностей технологических процессов;

4. логистическое взаимовлияние потоков гружёных и порожних автомобилей.

- Регистрация показателей осуществляется с использованием *SAVEVALUE*:

1. суммарное время выполнения рейса;

2. длительности отдельных операций;

3. количество выполненных рейсов за период;

4. общий объём вывезенной горной массы.

- Горизонт моделирования составляет 86400 секунд (одни сутки). Такое значение обеспечивает получение оценок производительности при условии многократного прохождения автосамосвалами полного цикла движения по пути.
- Результатом моделирования является вычисление среднего времени рейса и производительности автотранспортной системы, что позволяет определять рациональное количество самосвалов, оценивать влияние параметров технологического процесса и выявлять узкие места в схеме работы карьера.

- Модель может быть использована для проведения серийных прогонов с варьированием:

1. количества автосамосвалов,
2. ёмкостей площадок погрузки и разгрузки,
3. статистических характеристик операций,
4. коэффициентов работоспособности, что обеспечивает возможность оптимизационного анализа и принятия управленческих решений.

Интеллектуальная обработка результатов имитационного эксперимента и построение прогностической модели.

В дополнение к разработанной дискретно-событийной имитационной модели погрузочно-транспортного комплекса в среде GPSS была реализована система автоматизированного сбора, накопления и дальнейшего анализа данных на основе методов машинного обучения. Такой подход позволяет не только проводить вычислительные эксперименты, но и строить модели в качестве аппроксимации, которые способные предсказывать производительность комплекса по набору входных параметров без повторного запуска имитации. Где можно выделить соответствующие этапы:

1. Сбор данных из GPSS-модели

Для интеграции имитационной модели с инструментами анализа в среде C# был реализован модуль, обеспечивающий автоматический запуск GPSS, извлечение результатов каждого проведенного имитационного эксперимента (прогона) и сохранение их в удобном виде, для дальнейшего использования.

Формируемый набор данных включает:

- значения параметров технологического цикла автосамосвалов (времена манёвров, погрузки, разгрузки, гружёного и порожнего хода);
- количество доступных автосамосвалов;
- коэффициенты работоспособности отдельных операций;
- итоговые показатели эффективности (длительность рейсов, количество рейсов, объём вывезенной горной массы).

В результате формируется обучающий датасет, содержащий сотни или тысячи наблюдений, каждое из которых представляет собой результат отдельного имитационного прогона.

2. Обучение прогностической ИИ-модели

Для предсказания производительности по набору входных параметров разработана модель машинного обучения на Python, использующая библиотеку scikit-learn.

2.1. Предварительная обработка данных

Программа автоматически загружает датасет, очищает его от пропусков и формирует матрицу признаков X и целевой показатель y(Target_Production — суммарная добыча за сутки).

Для учёта нелинейных зависимостей применяется:

- стандартизация признаков;
- расширение признакового пространства полиномиальными взаимодействиями второго порядка.

2.2. Модель и подбор гиперпараметров

В качестве базовой модели используется статический метод, хорошо работающая на малошумных и умеренно размерных наборах данных.

Параметры модели подбираются методом настройки гиперпараметров с кросс-валидацией:

- гиперпараметры регуляризации (α_1, λ_1);
- максимальное число итераций оптимизации.

Это позволяет получить наиболее устойчивую модель, минимизирующую среднеквадратичную ошибку на валидационных данных.

2.3. Оптимизационный модуль

Для нахождения оптимального набора производственных параметров реализована процедура глобальной оптимизации на основе метода дифференциальной эволюции.

Оптимизатор позволяет:

- выбирать один или несколько варьируемых параметров (например, количество автосамосвалов, скорости, длительности операций);
- учитывать фиксированные параметры, заданные пользователем;
- находить комбинацию параметров, максимизирующую предсказанную производительность.

Функция приспособленности использует обученную модель и возвращает отрицательное значение производительности, что обеспечивает поиск максимума.

2.4. Формирование результата

На выход программа возвращает JSON:

- оптимальные значения заданных пользователем параметров;
- прогнозируемую производительность системы при этих значениях.

Таким образом, на основе имитационных данных создаётся автономная прогностическая система, способная:

- мгновенно оценивать производительность по заданным параметрам;
- выполнять оптимизацию конфигурации комплекса;
- выступать как цифровой двойник карьера в задачах оперативного и стратегического планирования.

3. Научная новизна и практическая значимость

Разработанная связка «GPSS-имитация – сбор данных – обучение ИИ-модели – оптимизация» обеспечивает:

- получение метамодели, способной заменить дорогостоящие и длительные имитационные эксперименты;
- анализ чувствительности производительности к входным параметрам;
- выбор рационального числа автосамосвалов и режимов работы техники;
- оценку системных узких мест и эффекта вариативности технологических операций.

Подобная интеграция имитационного моделирования с методами машинного обучения представляет собой современный подход к созданию

цифровых двойников горных предприятий и может применяться в системах поддержки принятия решений.

Список литературы:

1. Кузнецов, В.А. "Оптимизация параметров карьерных экскаваторно-автомобильных комплексов с учетом внеплановых простоев" // диссертация, Кузбасский государственный технический университет, 2022. https://science.kuzstu.ru/wp-content/docs/OAD/Soresearchers/2022/kuz/aut.pdf

2. Кудрявцев, Е.М. "GPSS World. Основы имитационного моделирования различных систем". — М.: ДМК Пресс, 2004. — 320 с.: ил. (Серия «Проектирование»). ISBN 5-94074-219-X.

3. Гудфеллоу, Я., Бенджио, И., Курвилль, А. "Глубокое обучение". — М.: ДМК Пресс, 2017. — 652 с.

4. Шолле, Ф. "Глубокое обучение на Python". — СПб.: Питер, 2018. — 400 с.: ил. — (Серия «Библиотека программиста»). ISBN 978-5-4461-0770-4. — ББК 32.973.2-018.1. — УДК 004.43.