

УДК 004.8

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ С ПОМОЩЬЮ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Е. А. ЯКИМОВ

Государственное учреждение высшего профессионального образования
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Могилев, Беларусь

Рациональный выбор параметров моделей технологических процессов затруднен тем, что сложно выразить зависимость между входными и выходными параметрами модели исследуемой системы в аналитическом виде. Это вынуждает использовать имитационные модели (ИМ) для описания подобных систем. При исследовании и эксплуатации ИМ требуется получение определенных свойств исследуемой системы, для чего необходимо найти значения параметров модели, обеспечивающих эти свойства. Одним из путей выявления свойств моделей и оценки качества исследуемого объекта является анализ временных последовательностей данных, собираемых непосредственно на самом объекте.

Например, исследования обрывности нитей при их вытягивании на заводе полиэфирных нитей позволяют утверждать, что анализ временных последовательностей статистических данных обрывности помогает составить объективное заключение о состоянии технологических потоков, своевременно предпринимать необходимые действия для их корректировки.

В имитационном моделировании в основном используются статистические методы оценки последовательностей данных. Для наиболее точного определения типа распределения данных используются обобщенные законы распределения Пирсона, Джонсона, В. В. Нешистого и др. В последнее время все более часто используются методы извлечения информации, основанные на искусственных нейронных сетях с использованием нечетких множеств и нечеткой логики, кластерном анализе и др. В то же время отсутствуют сведения об использовании в имитационном моделировании сингулярного спектрального анализа (другое название *SSA* – *Singular Spectrum Analysis*) временных рядов, который позволяет получить дополнительную информацию о структуре данных разложением исходного временного ряда на трендовую, периодическую и шумовую составляющие. При исследовании *SSA* трендом полагают медленно меняющуюся составляющую, описывающую глобальное поведение ряда. Под шумовой составляющей ряда понимают реализацию случайной последовательности чисел.

Предложен итерационный процесс P извлечения полезной информации из данных, накопленных в базах данных комплексных информационных систем, представленный композицией операторов $P = T_6 \circ T_5 \circ T_4 \circ T_3 \circ T_2 \circ T_1$. Оператор T_1 представляет отбор данных, накопленных в комплексных ин-

формационных системах предприятий; T_2 – предварительная обработка данных; T_3 – выбор данных для исследования в соответствии с решаемой задачей, отличается формированием *XML*-файла для автоматизированной обработки; T_4 – выбор метода поиска закономерностей, основанных в основном на применении статистических исследований, отличается использованием сингулярного спектрального анализа и обобщенного закона распределения для оценки типа распределения случайных величин; T_5 – построение модели исходных данных для применения в имитационной модели на этапе ее эксплуатации; T_6 – формирование *XML*-файла с моделью последовательности данных для последующего применения.

Сингулярный спектральный анализ последовательностей данных включает следующие этапы: вложение, сингулярное разложение, группировку, диагональное усреднение. Методика исследования сингулярного спектрального анализа временных рядов с комплексным применением информационных технологий основана на использовании табличного процессора MS Excel, математического пакета Mathcad, пакета статистической обработки данных Statistica и отличается применением сдвиговых процедур при формировании ганкелевой матрицы на этапе вложения и при восстановлении составляющих исходного временного ряда на этапе диагонального усреднения. На этапе группировки в MS Excel используется лепестковая диаграмма, которая является аналогом графика в полярной системе координат, отображая распределение значений относительно начала координат. По особенностям представления сингулярных векторов на лепестковой диаграмме принимается решение о принадлежности их одной группе (рис. 1 и 2).

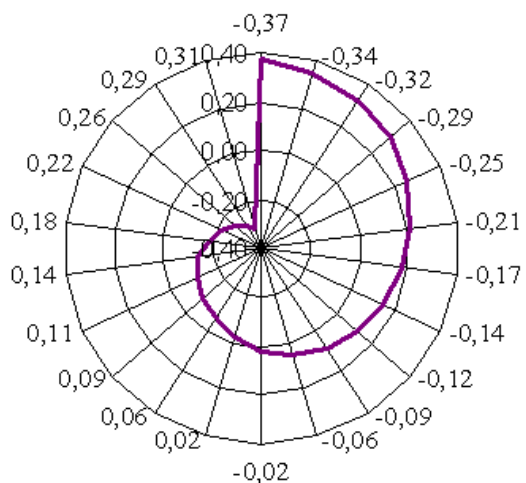


Рис. 1. Лепестковая диаграмма вектора тренда

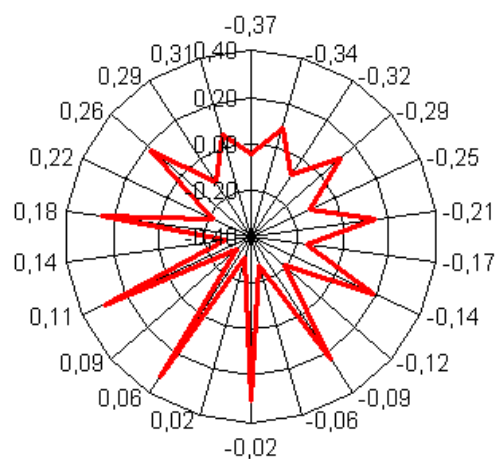


Рис. 2. Лепестковая диаграмма вектора шума

Проведены исследования, получены оценки и выявлены особенности погрешности восстановления временного детерминированного ряда G , образованного функциями $F(x) = ax + b\sin(x) + c$, a, b, c – параметры, $x = 0, \dots, 42$. Относительная ошибка восстановления тренда ΔF_T составляет 2,3 %, гармо-

нической составляющей ΔF_H – 14,3 %. При анализе результатов обнаружено, что абсолютная ошибка восстановления тренда и гармонической составляющей для начальных и конечных значений ряда имеет наибольшие значения (рис. 3 и 4).

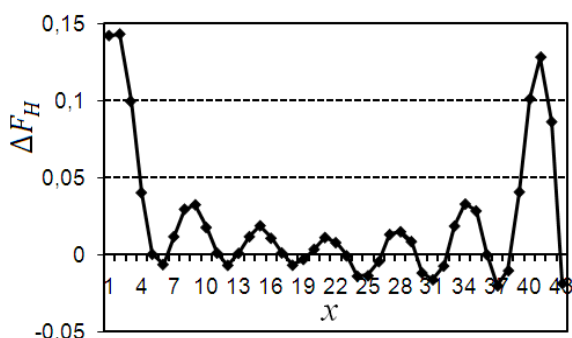


Рис. 3. Распределение абсолютной ошибки восстановления гармонической составляющей

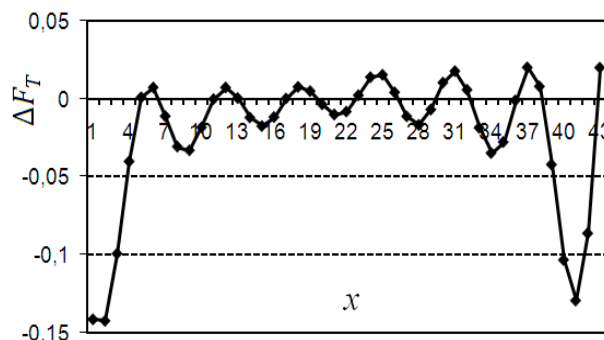


Рис. 4. Распределение абсолютной ошибки восстановления тренда

Проведены численные исследования методом сингулярного спектрального анализа временных рядов с известными моделями его трендовой, гармонической и шумовой составляющей. Методика проведения экспериментальных исследований включает выбор исходного временного ряда $G = G_T + G_H + G_N$, который задан известными моделями соответственно трендовой и гармонической составляющей $G_T = ax + b$, $G_H = c \sin x$, $x = 0, \dots, 42$; a , b , c – параметры, изменяемые при исследовании; индексы T , H , N – трендовая, гармоническая и шумовая составляющие соответственно. Шумовая составляющая задана моделями равномерного, нормального и экспоненциального распределения.

При преобразовании исследуемых рядов восстановление шумовой составляющей всегда выполняется с математическим ожиданием, равным нулю. Проверка по критерию Колмогорова – Смирнова ($p = 0,01$) соответствия, полученных в ходе преобразования случайных чисел, показала, что шумовая составляющая сохраняет свой тип распределения.

Исследование методом сингулярного спектрального анализа временных рядов показало, что шумовая составляющая восстановленного ряда для равномерного, экспоненциального и нормального распределения смещается в сторону нуля на величину математического ожидания шумовой составляющей исходного ряда с погрешностью до 6 % и возрастает до 30 % при росте дисперсии шума исходного ряда до 25 раз. Стандартное отклонение шумовой составляющей восстановленного ряда отличается от исходного на 7–9 % во всех случаях.

Важным результатом исследования является вывод о независимости качества восстановления составляющих временного ряда от величины постоянной составляющей исходного временного ряда. Однако следует заметить, что при нулевой постоянной составляющей $G_{TC} = 0$, не удастся восстановить

динамическую составляющую тренда исходного временного ряда (рис. 5 и 6).

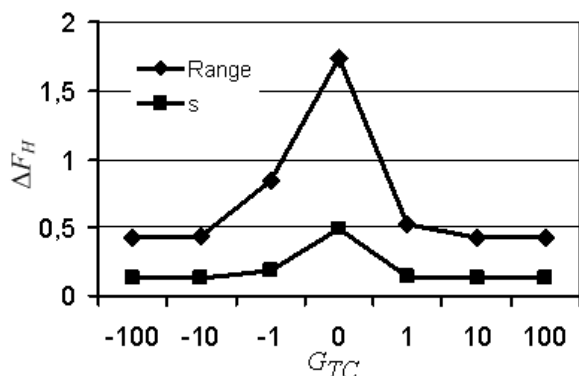


Рис. 5. Показатели ошибки восстановления гармоники

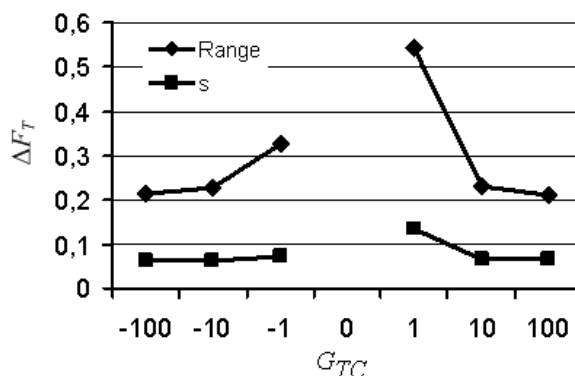


Рис. 6. Показатели ошибки восстановления тренда

Для использования результатов исследований метода извлечения полезной информации на основе сингулярного спектрального анализа в качестве объекта моделирования принят производственный процесс изготовления изделий из ячеистого бетона.

Блоки стеновые и плиты теплоизоляционные из ячеистых бетонов изготавливаются методом формования смеси размолотой извести, кварцевого песка, цемента, воды и алюминиевой пудры с последующей автоклавной обработкой. Производство блоков осуществляется в следующей последовательности технологических операций: доставка, выгрузка, транспортирование, хранение и помол сырья; приготовление алюминиевой суспензии; приготовление смазки; подготовка оснастки; приготовление формовочной смеси и формование изделий; механизированная резка; автоклавная обработка; расформовка и вывоз готовой продукции на склад. Модель производственного процесса строится для решения, в первую очередь, задачи экономии топливно-энергетических ресурсов на функционирующем предприятии.

Для технологического процесса изготовления блоков из ячеистого бетона разработана концептуальная модель. На ее основе для определения максимального потока изделий (вещества) построен потоковый граф и математическое описание представлено в терминах задачи линейного программирования.

Выполнен анализ времени дозирования компонентов, который показал, что вероятностный характер процессов при изготовлении блоков из ячеистого бетона не позволяет применить методы, основанные на потоковой модели.

Для исследования последовательностей данных и извлечения информации о вероятностных процессах разработан программный модуль анализа временного ряда для оценки кривой семейства Пирсона плотности распределения шумовой составляющей. Соответствие теоретического распределения

с исследуемой плотностью проверяется по критерию Колмогорова-Смирнова, χ^2 Пирсона, ω^2 Мизеса.

Для построения имитационной модели технологического процесса применяется программно-технологический комплекс имитации сложных систем (ПТКИ) BelSim, использующий процессный способ моделирования. Готовая имитационная модель представляет собой исполняемый файл. Взаимодействие между исполняемым файлом имитационной модели и основными компонентами ПТКИ BelSim реализуется на основе файла данных модели. В этом файле хранятся параметры и отклики ИМ в формате XML. Для сокращения времени, затрачиваемого на программирование ИМ, разработан шаблон файла программы, определяющий данные модели, процессы с их инициализацией и алгоритмами методов, указываются отклики имитационной модели.

При поиске путей экономии топливно-энергетических ресурсов построена имитационная модель производства изделий из ячеистого бетона. Имитационная модель спроектирована для решения, в первую очередь, задачи поиска путей экономии электроэнергии (рис. 7).

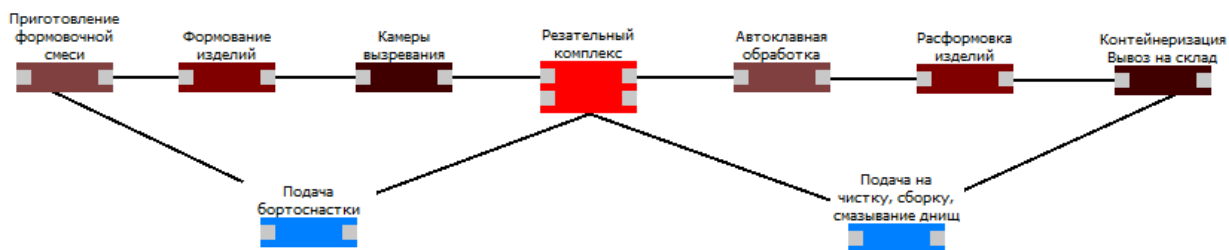


Рис. 7. Структура имитационной модели

Результаты эксплуатации модели проверены на действующем производстве. Участок дозирования компонентов при подготовке формовочной смеси (рис. 7) является одним из узких мест технологического процесса. Анализ времени дозирования компонентов в ходе технологического процесса показывает, что время описывается экспоненциальным законом распределения со следующими параметрами: $\gamma = 0$, $\beta \in [0,0274; 0,0366]$, γ – параметр порога, β – параметр масштаба. При исследованиях в ходе эксплуатации имитационной модели параметр β принимал значения 0,0298; 0,0281; 0,0274; 0,0303; 0,0366 [мин⁻¹], учет которых повышает эффективность эксплуатации имитационной модели при оптимизации технологического процесса.