

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ТРАНСПОРТНОГО КОМПЛЕКСА

УДК 519.87:332.02

Д. Н. ШЕВЧЕНКО, кандидат технических наук, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

**ТЕХНОЛОГИЯ И СРЕДСТВО ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ВЕРОЯТНОСТНЫХ СЕТЕВЫХ ГРАФИКОВ**

Показаны возможности имитационного моделирования технологических процессов. Предложены средство автоматизации и технология имитационного моделирования вероятностных характеристик (в том числе вероятности своевременного выполнения) технологических процессов, заданных сетевым графиком. Указан класс технологических процессов, для которых применим предлагаемый метод и средство исследования.

При планировании, организации и управлении технологическими процессами (ТП), в частности, для определения сроков выполнения комплекса технологических операций (ТО), широко применяются методы сетевого планирования и управления, математической моделью которых является сетевой график [1–3]. Дуги сетевого графика обозначают ТО с указанием длительности, а вершины – события, связанные с началом и окончанием ТО (рисунок 1).

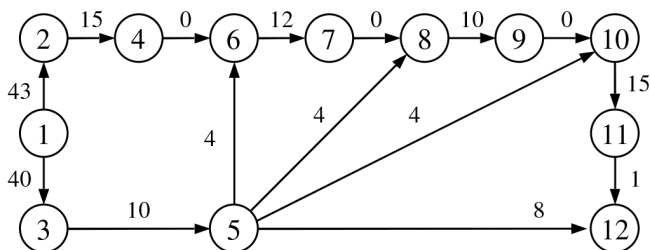


Рисунок 1 – Сетевой график укладки пути и стрелочных переводов:

- 1 – накопление материалов; 2 – сборка путевой решетки;
- 3 – сборка стрелочных переводов; 4 – транспортировка путевой решетки;
- 5 – вывоз стрелочных переводов; 6 – укладка стрелочных переводов на станции;
- 7 – укладка путевой решетки на 1-м перегоне;
- 8 – укладка стрелочных переводов на 1-м разъезде;
- 9 – укладка путевой решетки на 2-м перегоне;
- 10 – укладка стрелочных переводов на 2-м разъезде;
- 11 – укладка путевой решетки на 3-м перегоне;
- 12 – укладка стрелочных переводов на конечной станции

Технологические процессы и соответствующие им сетевые графики можно различать по критериям, представленным в таблице 1.

В настоящее время широко представлены аналитические методы *СРМ* для анализа и оптимизации детерминированных сетевых графиков – моделей ТП с постоянной структурой (составом и последовательностью ТО) и длительностью выполнения ТО (таблица 2).

Таблица 1 – Классификация ТП

Структура ТП (состав и последовательность ТО)	Критерии	
	Длительность выполнения ТО	Условия, определяющие структуру ТП и длительность выполнения ТО
Детерминирована (точно определена)	Детерминирована (точно определена)	Отсутствуют
Случайна	Случайна	Определяются длительностью выполнения предшествующих ТО
Зависит от некоторых условий	Зависит от некоторых условий	Определяются выполнением некоторых случайных событий (например, досрочного выполнения некоторых ТО)
		Определяются наличием некоторых ограниченных ресурсов (свободных складских мест, операторов, локомотивного парка и т. п.)

Таблица 2 – Методы, применимые для исследования ТП

Метод	Класс исследуемых ТП		
	Условия, определяющие структуру ТП и длительность выполнения ТО	Структура ТП	Длительность выполнения ТО
СРМ	Отсутствуют	Детерминирована	Детерминирована
PERT	Отсутствуют	Детерминирована	Детерминирована
		Случайна	Случайна
ИМ	Без ограничений	Без ограничений	Без ограничений

Методы *PERT* базируются на вероятностных сетевых графиках и ориентированы на более широкий класс ТП, в которых отсутствует постоянство структуры и длительности ТО. Вместе с тем данные методы [1, 3]:

- используют ряд допущений (например, о β -распределении времени выполнения ТО), снижающих адекватность математической модели;
- определяют недостаточное количество характеристик времени выполнения ТП (обычно ограничиваются математическим ожиданием и дисперсией);
- не определяют вероятность своевременного выполнения ТП [3];
- сложность модели возрастает много быстрее сложности ТП;
- незначительное изменение задачи требует значительной корректировки модели (например, при изменении закона распределения длительностей ТО).

Наиболее универсальным методом анализа ТП является имитационное моделирование (ИМ, см. таблицу 2). Оно позволяет проводить анализ сетевых графиков с произвольной структурой, законами распределения длительностей ТО и произвольными условиями, определяющими структуру ТП и длительность ТО. Многократно воспроизводя на имитационной модели выполнение ТП, можно собирать статистику о всех интересующих характеристиках (резервы времени, критический путь, вероятность своевременного выполнения ТП и др.).

Основными причинами, сдерживающими широкое применение ИМ, является сложность:

- 1) адекватного описания ТП (включающего структуру ТП, длительности ТО и другую информацию) на языке, понятном ЭВМ (Паскаль, Си и др.);
- 2) организации и планирования имитационных экспериментов, а также анализа результатов моделирования.

Возможным решением данной проблемы является создание специализированных средств автоматизации имитационного моделирования ТП или адаптация уже существующих средств, ориентированных на аналогичные объекты исследования. Специализированные средства автоматизации ИМ (по сравнению с универсальными языками программирования) реализуют, как правило, следующие функции:

- возможность визуального построения имитационной модели;
- автоматизация постановки и проведения имитационных экспериментов (в соответствии с типовыми методиками);
- автоматическое документирование, анализ и наглядное представление результатов моделирования, которые в совокупности делают процедуру моделирования наглядной и существенно снижают требуемые временные и материальные затраты.

Для автоматизации ИМ вероятностных сетевых графиков в работе предлагается пакет СМ-ДЭС [4] и технология его использования для определения основных характеристик ТП, в том числе вероятности своевременного выполнения ТП. Пакет

СМ-ДЭС, разработанный автором, изначально специализировался на ИМ дискретных электронных систем, что обусловило некоторые особенности его применения. Компоненты исследуемой системы формализуются в виде агрегатов, обменивающихся сигналами. Для моделирования сетевых графиков в СМ-ДЭС дополнительно реализовано два специальных класса агрегатов (рисунок 2):

- «работы» («→»), предназначенные для имитации задержки передачи сигнала на время, равное длительности выполнения ТО;
- «события» («Ev»), предназначенные для фиксации сигналов, имитирующих завершение одной или нескольких ТО.

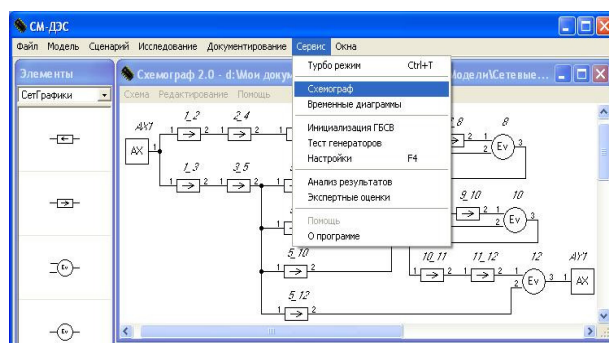


Рисунок 2 – Построение имитационной модели сетевого графика в пакете СМ-ДЭС

Продemonстрируем технологию и результаты имитационного моделирования ТП укладки пути и стрелочных переводов на участке железной дороги, сетевой график которого представлен на рисунке 1. Визуальное изображение имитационной модели в пакете СМ-ДЭС (рисунок 3) полностью повторяет изображение исследуемого сетевого графика ТП, но кроме прочих включает агрегат «АХ1», предназначенный для выработки входного сигнала, и агрегат «АУ1», необходимый для контроля выходного сигнала.

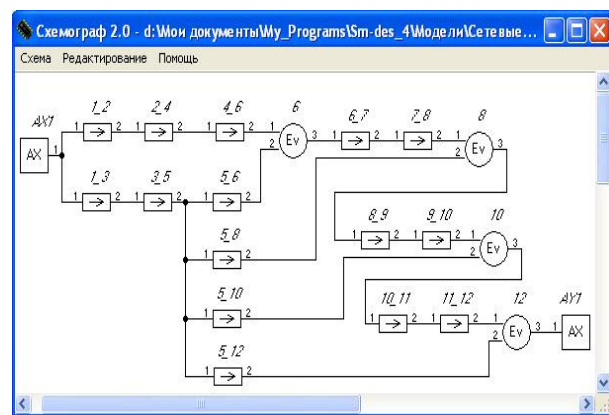


Рисунок 3 – Имитационная модель ТП в СМ-ДЭС

На рисунке 3 имя агрегатов-работ («→») включает в себя номер события-начала и номер события-окончания соответствующей ТО.

Выполнение технологических операций ТП отождествляется в СМ-ДЭС с передачей сигнала от одного агрегата к другому (начиная с агрегата «АХ1») с задержками, соответствующими времени выполнения каждой ТО, которые могут иметь произвольный закон распределения (рисунок 4). Завершению ТП соответствует поступление сигнала на агрегат «АУ1».

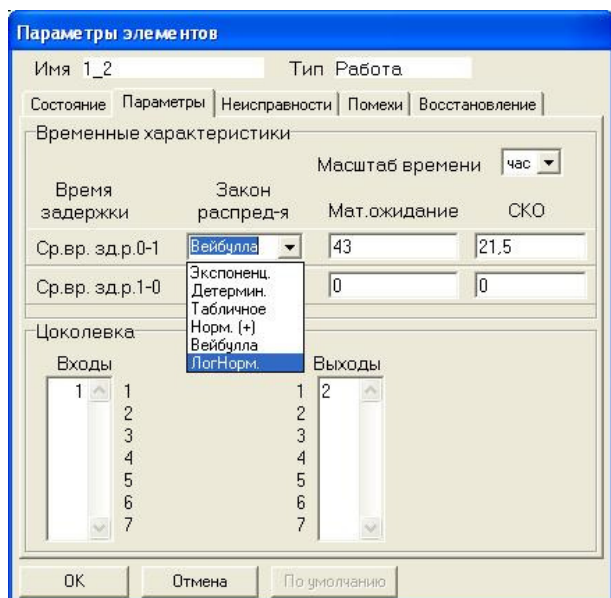


Рисунок 4 – Задание времени выполнения ТО в пакете СМ-ДЭС

Подобным образом в пакете СМ-ДЭС могут быть формализованы и исследованы сетевые графики широкого класса ТП (см. таблицы 2 и 3).

Таблица 3 – Классы сетевых графиков, реализованных в пакете СМ-ДЭС

Условия, определяющие структуру ТП и длительность выполнения ТО	Структура ТП	Длительность выполнения ТО
Отсутствуют	Детерминирована	Детерминирована
	Случайна	Случайна
Определяются длительностью выполнения предшествующих ТО	Детерминирована	Детерминирована
	Случайна	Случайна
Определяются выполнением некоторых случайных событий	Детерминирована	Детерминирована
	Случайна	Случайна

Для ИМ вероятностных сетевых графиков в пакете СМ-ДЭС необходимо указать режимы и настройки исследования, аналогичные представленным на рисунке 5.

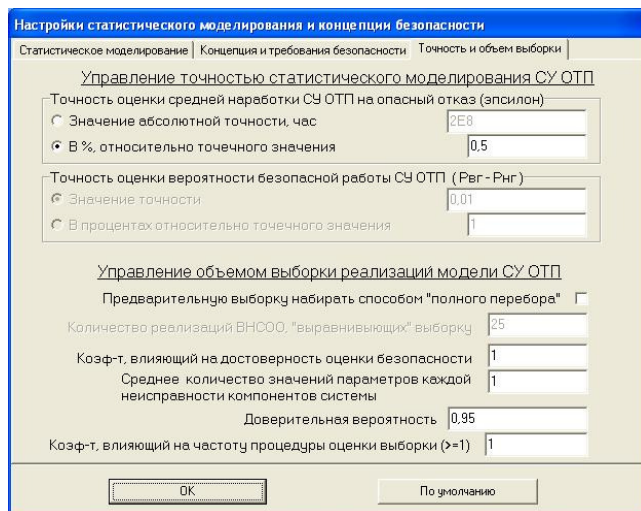
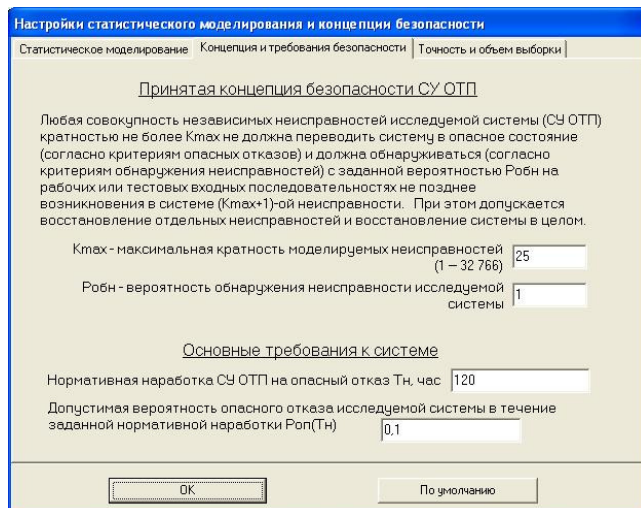
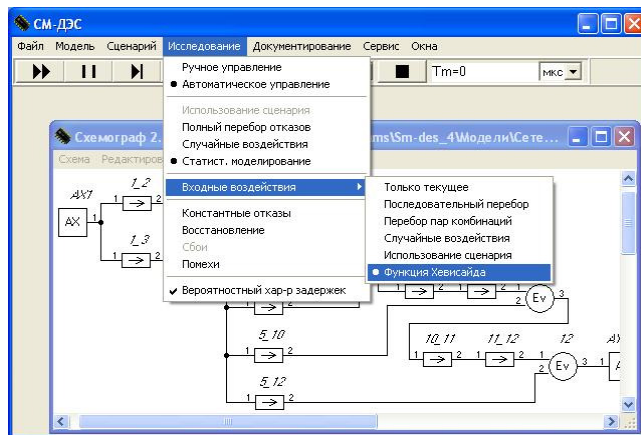


Рисунок 5 – Задание режимов и настроек моделирования в пакете СМ-ДЭС

В случае, когда длительности ТО детерминированы, время выполнения ТП составляет 96 часов. Если допустить, что длительности ТО случайны и подчиняются логнормальному закону распределения с математическим ожиданием, равным соответствующему значению на рисунке 1, и стандартным отклонением, вдвое меньшим, чем математическое ожидание, то время выполнения ТП является случайной величиной (рисунок 6).

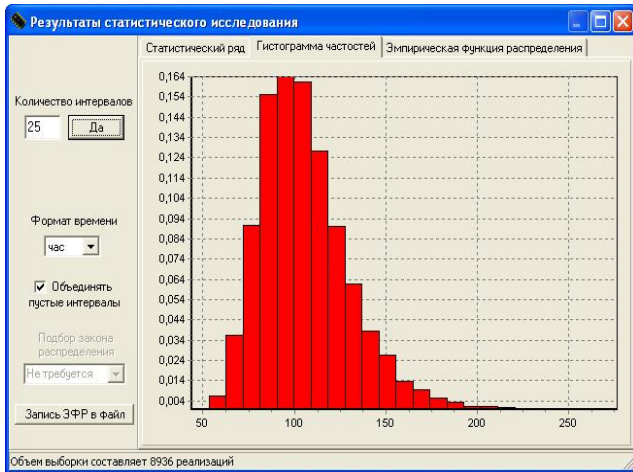


Рисунок 6 – Гистограмма времени выполнения ТП укладки пути и стрелочных переводов

Для обеспечения заданной точности оценок вероятностных характеристик ТП (см. рисунок 5, б и в) методом статистического моделирования в СМ-ДЭС потребовалось 8936 реализаций имитационной модели. При этом были получены оценки основных характеристик ТП (таблица 4).

Таблица 4 – Оценки характеристик ТП укладки пути и стрелочных переводов в СМ-ДЭС

Характеристика ТП		Оценка
Математическое ожидание времени выполнения ТП		105,734 ч
Стандартное отклонение времени выполнения ТП		24,719 ч
С вероятностью 0,95 истинное значение математического ожидания времени выполнения ТП	превышает	105,205 ч
	не превышает	106,262 ч
Вероятность своевременного выполнения ТП в течение	110 ч	0,63149
	120 ч	0,7613
	130 ч	0,85307
	150 ч	0,94752
95-гамма-процентное время выполнения ТП		151,441 ч

Получено 19.09.2008

D. N. Shevchenko. Technology and facility of simulation modeling probabilistic network graph.

Possibility of simulation modeling of the technological processes are shown. The offered facility to automations and technology of simulation modeling of the probabilistic features (probability of well-timed execution) of the technological processes, given by network graph. The Specified class technological processes, for which shall use the proposed method and facility of the study.

Аналогичным образом могут быть определены и другие характеристики ТП или некоторых его этапов.

Можно констатировать, что предлагаемый пакет и технология ИМ позволяют:

- исследовать широкий класс ТП, включая процессы с произвольной структурой и длительностями ТО;

- определять большое количество вероятностных показателей ТП, в том числе вероятность своевременного выполнения ТП;

- имеют высокий уровень автоматизации, что существенно сокращает материальные и временные затраты на исследование ТП и позволяет использовать пакет СМ-ДЭС инженерами без специальной подготовки в области математического моделирования.

Предлагаемый пакет и технология ИМ апробировались в ходе дипломного проектирования студентами специальности «Строительство дорог и транспортных объектов» в 2006/07 и 2007/08 учебных годах.

Список литературы

1 **Костевич, Л. С.** Математическое программирование: Информационные технологии оптимальных решений : учеб. пособие / Л. С. Костевич. – Мн. : Новое знание, 2003. – 424 с.

2 **Нехорошев, Ю. П.** Организация и планирование строительного производства. Ч. I. Теоретические основы организации и планирования строительного производства : учеб. пособие / Ю. П. Нехорошев. – Гомель : БелГУТ, 1999. – 87 с.

3 **Томберг, К. И.** Расчет надежности управленческих решений в автодорожном строительстве : учеб. пособие / К. И. Томберг, О. К. Клещенко. – Гомель : БелГУТ, 2004. – 31 с.

4 **Shevchenko, D. N.** Program Technological Complex of a Research of Safety of Electronic Systems / D. N. Shevchenko // Computer Data Analysis and Modeling: Robustness and Computer Intensive Methods : Proc. 6th International Conference. – Minsk : BSU, 2001. – Vol. 2. – P. 208–213.