

УДК 621.86

Немчук А.О. к.т.н.; Матоликов Д.П., Галевский В.В.

Одесский национальный морской университет

**ТЕСТИРОВАНИЕ ДВУХ КОНФИГУРАЦИЙ СЕКЦИИ
ИМИТАЦИИ ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ РАБОТ
ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ИМИТАЦИОННОГО
ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ ТЕХНИКО-
ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СЛОЖНЫХ
ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Аннотация. В статье рассматриваются результаты сравнения эффективности двух вариантов функционирования секции имитации восстановительных работ программного комплекса имитационного прогнозирования динамики технико-экономических параметров сложных технических систем. Приведены алгоритмы альтернативного метода проведения имитации восстановительных работ, основанные на преобразовании GERT-сети восстановительных процессов с использованием гистограмм распределений исходных данных. Результаты имитации восстановительных работ мостового крана подтверждают повышение производительности и точности вычислений при использовании альтернативного метода.

Ключевые слова: имитационная модель, перегрузочное оборудование, техническое обслуживание, коэффициент функционального состояния, оптимизация.

Анотація. У статті розглядаються результати порівняння ефективності двох варіантів функціонування секції імітації відновлювальних робіт програмного комплексу імітаційного прогнозування динаміки техніко-економічних параметрів складних технічних систем. Наведено алгоритми альтернативного методу проведення імітації відновлювальних робіт, засновані на перетворенні GERT-мережі відновлювальних процесів з використанням гістограм розподілів вихідних даних. Результати імітації відновлювальних робіт мостового крана підтверджують підвищення продуктивності і точності обчислень при використанні альтернативного методу.

Ключові слова: імітаційна модель, перевантажувальне обладнання, технічне обслуговування, коефіцієнт функціонального стану, оптимізація.

Введение. Восстановительные работы производятся с целью восстановления работоспособности системы (ремонтные работы) или с целью поддержания состояния системы и предупреждения выхода её из строя (техническое обслуживание). Задача секции имитации

восстановительных работ (СИБ) – имитация процессов ремонта каждого элемента, определение и передача в другие части программного комплекса информации о новом значении уровня состояния каждого элемента, о времени, необходимом для выполнения ремонта в виде распределения вероятностей с учётом длительностей демонтажа механизмов, транспортировки к месту ремонта, разборки, проведения дефектации элементов, их восстановления (изготовления, закупки), сборки, контроля, доставки, монтажа, испытаний, наладки и возможных отклонений в этих сроках. Эта секция дополнительно определяет и передаёт в другие части программного комплекса количество специалистов, оборудования, запчастей, расходных материалов необходимых для восстановительных работ [1], [2].

Процесс восстановления любого элемента можно представить в виде GERT-сети. GERT-сети являются разновидностью сетевого графика. GERT-сети аналогичным способом отражают технологическую зависимость и последовательность выполнения комплекса работ, однако допускают динамическое изменение структуры сетевого графика. Изменение структуры графика определяется условиями или вероятностями выполнения работ графика, а также возможностью повторного выполнения части графика. Такие особенности GERT-сети позволяют более адекватно задавать описание сложных процессов в тех случаях, когда затруднительно или невозможно однозначно определить какие именно работы и в какой последовательности должны быть выполнены для достижения намеченного результата (т.е. существует многовариантность реализации проекта) [3]. Например, структура сетевого графика ремонтных работ не всегда требует выполнения всех работ, входящих в него. Иногда заданные условия определяют один из нескольких возможных вариантов развития процесса: выполняется восстановление работоспособности элемента или же его замена на работоспособный элемент (приобретенный или изготовленный силами предприятия). Кроме того, после проведения контроля качества выполненной работы существует вероятность повторного выполнения некоторой последовательности работ графика в связи с выявлением низкого качества восстановительных работ.

Расчёт GERT-сетей, моделирующих реальные процессы, чрезвычайно сложен, однако программное обеспечение для вычисления сетевых моделей такого типа в настоящее время, к сожалению, не распространено. Сложность расчёта GERT-сети обусловлена стохастическим характером работ входящих в сеть, а также зависимостью вероятности начала конкретной работы от выполнения определённых условий. Таким образом, однократное выполнение имитации восстановительных работ по GERT-сети даёт лишь один из множества вариантов значений затрат ресурсов (времени, денежных

средств, запасных частей, расходных материалов, специалистов, оборудования) и полученных результатов (уровня коэффициента годности восстановленного элемента). Только достаточное количество повторений выполнения GERT-сети даст выборку данных, которая сможет быть статистически проанализирована. Такое обстоятельство сводит решение GERT-сети к многократному проведению эксперимента по выполнению комплекса работ, накоплению необходимой информации и её анализу.

Целью данной статьи является сравнение эффективности двух вариантов функционирования СИВ программного комплекса имитационного прогнозирования динамики технико-экономических параметров сложных технических систем.

Изложение основного материала. Нами предлагается использовать метод имитационного моделирования для решения GERT-сети процесса восстановительных работ. Имитационное моделирование – метод получения данных о функционировании системы в результате проведения эксперимента на имитационной модели, представляющей из себя компьютерную программу, отражающую логическую структуру и динамику взаимодействия элементов реальной системы. При использовании данного метода выделяются как минимум два варианта функционирования СИВ. Рассмотрим суть и произведём сравнение обоих вариантов.

Первый вариант функционирования СИВ определим как вариант полной имитации (ВПИ). В условиях ВПИ в имитационной модели программируются все возможные переходы по ветвям GERT-сети процессов восстановления, вероятности и условия их выполнения. Учёт расхода времени и других ресурсов ведётся в явном виде (суммированием значений в ходе выполнения каждой работы сети во время прогона модели).

Выполнение прогона имитационной модели даёт возможность определить один из вариантов длительности выполнения комплекса работ и потребности в ресурсах. Многократное повторение прогона имитационной модели позволяет собрать статистику и построить гистограммы вероятностных распределений длительности выполнения работ и потребности в ресурсах, которые в дальнейшем используются в других частях программного комплекса. Многократный прогон модели занимает достаточно большое количество времени, что является существенным недостатком данного подхода.

Второй вариант функционирования СИВ определим как вариант частичной имитации (ВЧИ). Такое название указывает на то, что только часть из работ, входящих в GERT-сеть, будет выполняться в прогоне имитационной модели для получения результата поведения

системы. Остальная часть взаимосвязей процессов будет заменена аналитическими преобразованиями структуры комплекса работ.

Под преобразованием GERT-сети понимается последовательное объединение типовых частей сети в укрупнённые работы, вероятности и результаты выполнения которых эквивалентны результатам функционирования типовых частей.

Выделим следующие типовые части GERT-сети:

1. Ряды последовательных работ.
2. Ряды параллельных работ с началом и окончанием в общих событиях.
3. Разветвления GERT-сети.
4. Участки многократного повторения одной работы при выполнении определённых условий.

Во время преобразования производится обработка гистограмм вероятностных распределений параметров преобразуемых частей сети (распределения длительностей работ и требуемых ресурсов). Т.о. итогом преобразования будет получение результирующих гистограмм исследуемых параметров путём однократного прогона основной части модели практически без прогонов моделей работ, входящих в состав сети. Отдельного прогона (однократного или многократного) требуют только типовые части сети, результаты которых зависят от определённых условий. Выполнение этих условий чаще всего диктуются параметрами, определяемыми другими частями программного комплекса или же параметрами, значения которых зависят от результатов выполнения конкретной работы сети. К таким типовым частям относятся участки многократного повторения одной работы по условию и разветвления GERT-сети.

Рассмотрим алгоритмы преобразования гистограмм распределения длительности выполнения работ и требования к повторяемости типовых частей сети. Выбирая алгоритм преобразования гистограмм, учитывался уровень сложности его программирования в модели.

1. Алгоритм преобразования ряда последовательных работ. Преобразования производятся над гистограммами пары работ, выполняемых последовательно. Если последовательно идут более чем две работы, то следующее преобразование ведётся с использованием результата предыдущего и гистограммы следующей работы. Количество повторений алгоритма $m = n - 1$, где n – общее количество последовательных работ.

Рассмотрим пару работ А и В. Каждая работа характеризуется гистограммой распределения плотности вероятности выполнения работы по интервалам её длительности. Результатом преобразования гистограмм пары работ будет гистограмма эквивалентной работы R.

Каждая из гистограмм построена на одинаковом количестве интервалов k . Ширины интервалов гистограмм одинаковы и постоянны:

$$H = a_i - a_{i-1} = b_i - b_{i-1} = r_i - r_{i-1} = \text{const}, \quad (1)$$

где $a_i, a_{i-1}, b_i, b_{i-1}, r_i, r_{i-1}$ – точки разбиения (границы интервалов) выборки значений длительности работ А, В и R соответственно.

Обозначим вероятности выполнения работ А, В и R с длительностями t , соответствующими интервалам их гистограмм $(a_{i-1}, a_i], (b_{i-1}, b_i], (r_{i-1}, r_i]$ следующим образом:

$$P(t \in (a_{i-1}, a_i]) = P_i(A) \quad (2)$$

$$P(t \in (b_{i-1}, b_i]) = P_i(B) \quad (3)$$

$$P(t \in (r_{i-1}, r_i]) = P_i(R) \quad (4)$$

Вероятность $P_i(R)$ того, что эквивалентная работа R имеет длительность, соответствующую i -му интервалу её гистограммы равна вероятности того, что сумма длительностей работ А и В принадлежит этому интервалу. Вероятность появления одного из двух несовместных событий равна сумме вероятностей этих событий. Вероятность одновременного наступления двух независимых событий равна произведению вероятностей этих событий. Т. к. ширина интервалов гистограмм всех работ одинакова, то необходимо определить сумму вероятностей всех комбинаций длительностей работ А и В, сумма которых, соответствует i -му интервалу:

$$P_i(R) = \sum_{j=1}^{k-1} P_{i-j}(A) \cdot P_j(B), \quad i = 1, \dots, k \quad (5)$$

По формуле (5) определяются значения вероятности выполнения работы R с длительностями соответствующими всем интервалам гистограммы, которые и являются плотностями распределения результирующей гистограммы.

2. Алгоритм преобразования ряда параллельных работ. Преобразования производятся над гистограммами пары работ, выполняемых параллельно, т.е. таких работ, у которых начала исходят из одного общего события сети и окончания входят в одно общее событие сети. Если параллельно выполняются более чем две работы, то следующее преобразование ведётся с использованием результата предыдущего и гистограммы следующей работы. Событие окончания комплекса параллельных работ наступает только после выполнения всех работ. Количество повторений алгоритма $m = n - 1$, где n – общее количество параллельных работ.

Вероятность $P_i(R)$ того, что эквивалентная работа R имеет длительность, соответствующую i -му интервалу её гистограммы равна вероятности того, что пара работ A и B завершит своё выполнение в рамках i -го интервала длительностей. То есть равна вероятности того, что выполнится хотя бы одно из действий: обе работы завершатся в рамках i -го интервала; одна из работ завершится в рамках i -го интервала, а вторая – раньше. Тогда получим следующее выражение:

$$P_i(R) = P_i(A) \cdot P_i(B) + P_i(A) \cdot \sum_{j=1}^{i-1} P_j(B) + P_i(B) \cdot \sum_{j=1}^{i-1} P_j(A), \quad (6)$$

$$i = 1, \dots, k$$

По формуле (6) определяются значения вероятности выполнения работы R с длительностями соответствующими всем интервалам гистограммы, которые и являются плотностями распределения результирующей гистограммы.

3. Разветвления GERT-сети. В состав такой типовой части входят несколько работ исходящих из одного состояния. Выполнение той или иной работы может определяться или условиями перехода, или вероятностью перехода к ней. Основное требование для таких частей сети является то, что при переходе по условию они должны формулироваться так, чтобы избежать случая невыполнения условий перехода ни к одной из работ разветвления, а в случае перехода с заданной вероятностью сумма вероятностей выполнения всех работ разветвления должна равняться 1. При разветвлении по заданному условию для данной типовой части сети характерна необходимость однократного прогона её имитационной модели. В таком случае выполнение условий определяет работу, которая будет выполняться и она считается эквивалентной для этого участка сети работой, т.е. гистограммой распределения плотности вероятности длительности эквивалентной работы будет являться гистограмма работы, выполняющей условия перехода.

При разветвлении по заданной вероятности преобразования выполняются однократно одновременно для всех работ количеством n . Вероятность $P_i(R)$ того, что эквивалентная работа R имеет длительность, соответствующую i -му интервалу её гистограммы равна вероятности того, что длительность хотя бы одной из работ разветвления принадлежит этому интервалу. Обозначив вероятность перехода к определённой работе P_j , где j – номер работы разветвления, а вероятность выполнения j -ой работы с длительностью, соответствующей i -му интервалу гистограммы $P_{i,j}$, получим выражение:

$$P_i(R) = \sum_{j=1}^n P_{i,j} \cdot P_j, \quad i = 1, \dots, k \quad (7)$$

4. Участок многократного повторения одной работы при выполнении определённых условий. Такой участок, по сути, является собой ряд последовательных работ с одинаковыми характеристиками. Количество последовательных работ n (повторений выполнения одной работы) определяется условиями выхода из цикла. Поэтому для данной типовой части сети характерна необходимость многократного прогона её имитационной модели с целью определения количества выполнений работы, которое позволит удовлетворить условия выхода из цикла. Далее выполняется алгоритм аналогичный преобразованию ряда последовательных работ. Количество повторений алгоритма $m = n - 1$, где n – общее количество повторений работы.

Аналогичные преобразования позволяют получить эквивалентные гистограммы распределений затрат других ресурсов в ходе восстановительных процессов.

Длительность проведения прогонов моделей построенных по принципу ВПИ и ВЧИ является определяющим фактором сравнения их эффективности. В ВПИ она зависит от длительности выполнения операции прогона элементарной работы, общего числа работ комплекса GERT-сети, количества осуществляемых прогонов всей модели для достижения достаточной точности результатов и длительности дополнительных операций по обработке статистики и построения результирующей гистограммы. Длительности выполнения вычислительных операции определяются их сложностью и характеристиками ЭВМ, на которой выполняется прогон имитационной модели.

Длительность выполнения преобразований в ВЧИ зависит только от числа работ и длительности преобразования одной типовой части GERT-сети, которые также определяются вычислительной сложностью операции и характеристиками ЭВМ, на которой выполняется прогон модели.

Для сравнения эффективности использования двух вариантов на основе ВПИ и ВЧИ построим имитационные модели GERT-сети капитального ремонта мостового крана.

Капитальный ремонт оборудования мостового крана осуществляется по технологической схеме, представленной на рис. 1.

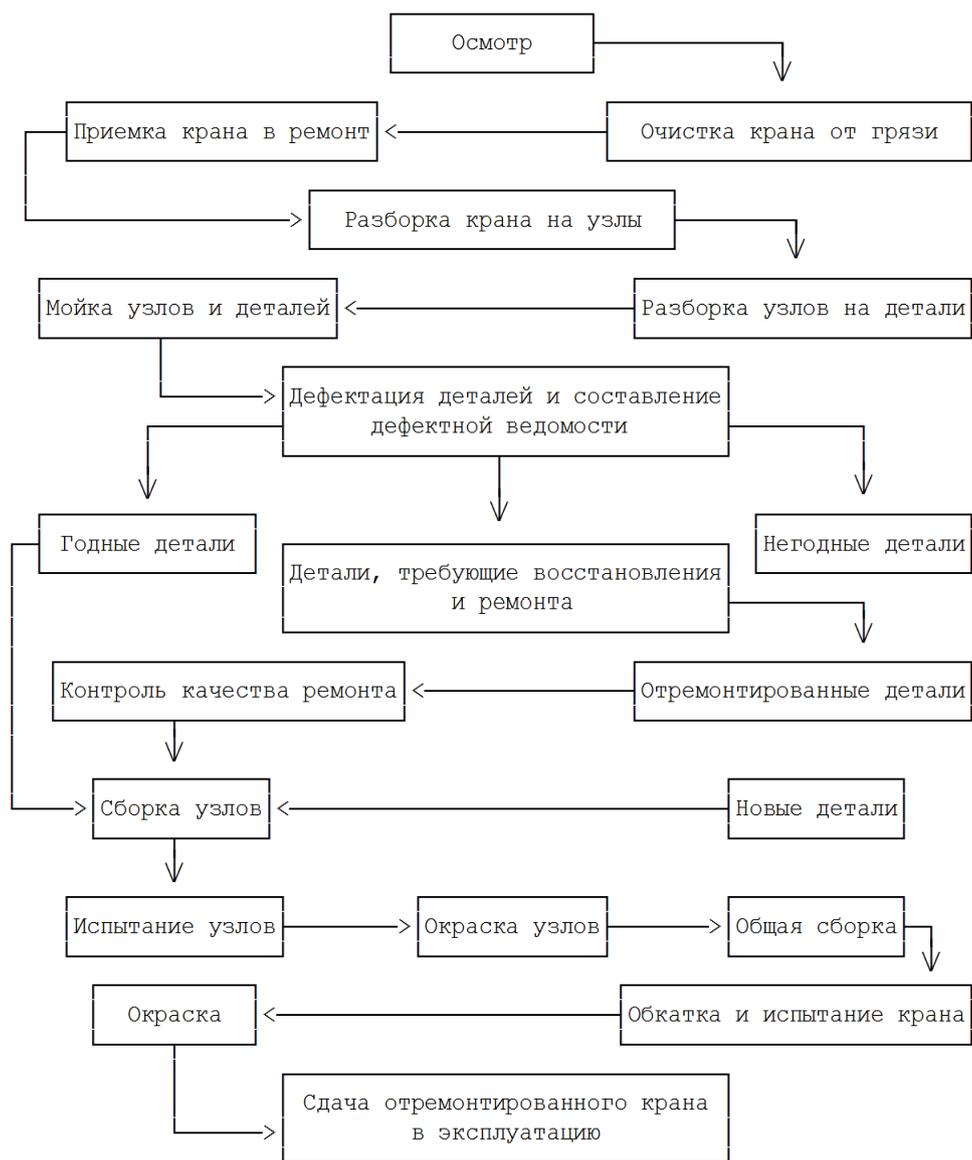


Рисунок 1 – Общая схема технологического процесса ремонта подъемно-транспортного оборудования

На основе ВПИ и ВЧИ построены две имитационные модели проведения восстановительных работ. В двух вариантах имитационной модели используются одинаковые наборы исходных данных: структура GERT-сети, количество деталей и узлов, состояние деталей, распределения вероятностей и условия выбора последовательностей процессов.

Таблица 1 – Результаты определения длительности комплекса восстановительных работ

	Общая длительность комплекса восстановительных работ, чел.-ч	Количество прогонов модели	Суммарная длительность прогонов модели, ч
Расчёт по типовым укрупнённым нормам времени	430,58	-	-
ВПИ с многократным прогоном модели	364,29	10 ⁴	316,1
ВПИ с достаточным числом прогонов	382,5	200	6,32
ВЧИ	365,48	1	0,16

В таблицу 1 сведены данные, позволяющие провести анализ эффективности работы вариантов модели: приведены данные расчёта планируемого времени предполагаемых восстановительных работ на основании типовых укрупнённых норм времени, используемых на предприятиях; приведены математические ожидания общей длительности комплекса восстановительных работ при использовании модели на основе ВПИ с многократным прогоном модели, при использовании модели на основе ВПИ с достаточным числом прогонов, при использовании модели на основе ВЧИ.

Определим достаточное количество прогонов как такое количество, которое даёт статистическую выборку с математическим ожиданием, отличающимся от его действительного значения не более чем на 5%. При этом каждый дополнительный прогон не вносит в статистическую выборку изменений, увеличивающих отклонение математического ожидания.

В итоге в ходе одного прогона модели на основе ВЧИ, который длился 0,16 ч, получены результаты, относительная погрешность которых составила 0,33 %. В свою очередь, 200 прогонов модели на основе ВПИ, которые длились 6,32 ч, дают результаты с погрешностью 5%.

Выводы. Проведённое тестирование двух конфигураций СИВ позволяет утверждать, что длительность выполнения прогона модели

построенной по варианту полной имитации всегда превосходит длительность выполнения преобразования GERT-сети по варианту частичной имитации не менее чем в $2K$ раз, где достаточное количество прогонов K для достижения приемлемой точности зависит от количества работ сети. Кроме того, тогда как в ВПИ производится обработка сокращённого ряда значений статистической выборки, в ВЧИ производится непосредственное преобразование гистограмм распределения плотностей вероятностей величин, и соответственно достигается большая точность результатов. Простая и универсальная форма алгоритмов преобразования гистограмм ВЧИ позволяет, используя упрощённый программный интерфейс, легко изменять структуру комплекса выполняемых работ. Это немаловажный фактор, т.к. в программном комплексе имитационного прогнозирования динамики технико-экономических параметров сложных технических систем отдельный комплекс восстановительных работ задаётся каждому элементу системы, число которых может достигать нескольких тысяч единиц.

ЛИТЕРАТУРА

1. Матоликов Д.П., Немчук А.О. Разработка программного комплекса имитационного прогнозирования динамики технико-экономических параметров сложных технических систем // Шоста міжнародна науково-практична конференція «Сучасні порти – проблеми та рішення». Тези доповідей. Одеса, 30 травня 2014 р. – Іллічівськ: «Гратек», 2014. – С. 51-55.
2. Крамской С.А., Матоликов Д.П. Определение продолжительности и трудоёмкости ремонта технических систем методом имитационного моделирования // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Х.: НТУ «ХПІ». – 2014. - № 3 (1046). – С. 84-91.
3. Демкин И.В., Стрельцов А.В., Галетов И.Д. Оценка риска инвестиционных проектов фармацевтического предприятия // Управление риском. – 2004. – №4, – С. 16-27.