УДК 629.46.004.67:51.001.57

В. В. МЯМЛИН (ДИИТ)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕОРИИ КУСОЧНО-ЛИНЕЙНЫХ АГРЕГАТОВ ДЛЯ ФОРМАЛИЗАЦИИ РАБОТЫ РЕМОНТНЫХ МОДУЛЕЙ ПОТОЧНОЙ ВАГОНОРЕМОНТНОЙ ЛИНИИ С ГИБКОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМОЙ

Розглянуто метод формалізації процесу роботи ремонтного модулю потокової лінії для ремонту вагонів з гнучкою транспортною системою. В якості математичної схеми процесу функціонування модулю запропонована окрема схема кусково-лінійного агрегату з теорії агрегатів. Ця схема може бути покладена в основу розробки імітаційних моделей для проектування та дослідження потокових вагоноремонтних ліній нової генерації.

Рассмотрен метод формализации процесса работы ремонтного модуля поточной линии для ремонта вагонов с гибкой транспортной системой. В качестве математической схемы процесса функционирования модуля предложена частная схема кусочно-линейного агрегата из теории агрегатов. Данная схема может быть положена в основу разработки имитационных моделей для проектирования и исследования поточных вагоноремонтных линий нового поколения.

The method of formalization of the repair module work process of the car-repair flow line with flexible transport system is considered. As the mathematical scheme of process of the module functioning, the specific scheme of a piecewise-linear unit from the theory of units is offered. The given scheme can be put in a basis of development of imitating models for designing and research of the car-repair flow lines of new generation.

При проектировании и строительстве существующих депо, использующих «типовые» поточные линии для ремонта вагонов, недостаточно уделялось внимания вопросам предпроектного анализа и моделирования технологических процессов. Поэтому неэффективность принятых проектных решений обнаруживалась только в ходе эксплуатации таких линий. А это уже затраченные огромные средства. Невооружённым глазом видна нерациональность такого подхода к разработке сложных производственных систем (СПС) как по времени, так и по затратам.

Особенности вагоноремонтного производства требуют учёта большого числа случайных факторов, оказывающих существенное влияние на работу поточных линий. Задача состоит в том, чтобы своевременно выявить эти факторы и уже с их учётом создавать такие производственные системы, которые могли бы легко адаптироваться к постоянно изменяющейся ремонтной среде. Существующие в настоящее время поточные линии для ремонта вагонов очень плохо приспособлены к условиям стохастического производства. Они очень чутко реагируют на любые колебания трудоёмкостей ремонтных работ. Вместе с тем, сегодня уже возможны и другие структурные варианты поточных линий, например, гибкие. В случае гибкой поточной линии появляется дополнительная свобода действий, которая проявляется в значительном увеличении числа альтернативных вариантов принятия управленческих (проектных) решений и согласования взаимодействия между отдельными производственными элементами. Это позволяет сглаживать многие производственные ситуации, вызванные нестабильностью ремонтной среды.

В связи с этим остро встаёт вопрос, связанный с более детальными проработками технологических решений ещё на стадии проектирования объектов. Одним из самых мощных инструментов на этой стадии должно явиться моделирование. По сути дела, моделирование – это имитация практической апробации будущего производства. Ранее автором уже рассматривались некоторые подходы к имитационному моделированию работы поточных вагоноремонтных линий с разными структурами [1–5].

При разработке модели имеют место различные степени абстрагирования. Остановимся только на крайних вариантах. Нижним уровнем выступает физическое моделирование, при котором функционирование объекта проверяется на модели, отличающейся от оригинала, в лучшем случае, размерами. Физические модели с учётом требований, вытекающих из теории подобия, соответствуют неплохой адекватности исследуемому объекту, а, следовательно, и высокой достоверности результатов моделирования. Общими недостатками таких моделей являются большая стоимость, отсутствие универсальности и длительная продолжительность эксперимента.

Верхним уровнем является математическое моделирование. Оно позволяет избежать существенных затрат, значительно сократить время проектирования, исключить метод натурных проб и ошибок. Поэтому для описания процессов, происходящих на поточной линии, мы будем пользоваться исключительно математическими моделями.

Согласно технологическому процессу, каждый ремонтируемый вагон должен последовательно пройти через ряд специальных позиций (участков): мойки, диагностики, разборки, ремонта, сборки, окраски и сушки. Кроме того, вагоны должны перемещаться при помощи трансбордерных тележек и где-то находиться в период ожидания выполнения следующего комплекса работ. Таким образом, гибкая поточная линия для ремонта вагонов представляет собой сложную организационно-технологическую систему, состоящую из отдельных элементов (подсистем), которые находятся в постоянном взаимодействии друг с другом.

При расчленении поточной линии как сложной системы на отдельные элементы будем считать, что для достаточной глубины проработки в качестве отдельных элементов целесообразно принимать всевозможные технологические модули. Такими модулями могут быть «ремонтный модуль» (РМ), «транспортный модуль» (ТМ), «модуль для ожидания» (ОМ).

В данной работе мы остановимся пока только на математической схеме функционирования ремонтного модуля. Под «ремонтным модулем» (РМ) будем понимать часть территории специализированной позиции, необходимой для размещения одного вагона, оснащённой специальным оборудованием, укомплектованной производственным персоналом и предназначенной для выполнения определённого комплекса технологических операций. На каждой позиции может находиться несколько однотипных, взаимозаменяемых РМ. Ремонтные модули одной позиции полностью идентичны. В настоящее время возможны различные структурные схемы организации поточных линий. В зависимости от вариантов компоновки поточной линии РМ могут быть связаны между собой напрямую (используется традиционный грузоведущий конвейер) либо через трансбордерные тележки. В варианте жёсткой поточной линии количество РМ соответствует фронту работы (число одновременно ремонтируемых вагонов). Для гибкой поточной линии количество РМ всегда превышает фронт работы поточной линии.

Любые процессы физической природы принято рассматривать в пространстве и во времени. Даже в самом примитивном случае механического движения возникает вопрос о перемещении, которое определяется изменением положения тела в пространстве в течение определённого интервала времени. Рассматривая эту концепцию в более широком смысле, и распространяя её на другие явления, в том числе производственные, под «положением» будем понимать «состояние»: $z(t)$ – состояние системы в момент времени t, а под «перемещением» – «процесс». Процесс представляет собой постоянный «переход» системы из одного состояния в другое.

Рассматриваемая нами система – поточная линия для ремонта вагонов – носит дискретный стохастический и динамический характер.

В дальнейшем, наравне с уже приведенной терминологией, будем также пользоваться известной терминологией теории массового обслуживания.

Поведение системы будем рассматривать на некотором интервале времени $[0,T]$. Будем считать, что характеристики системы изменяются во времени дискретно. Эти условия отражают динамический характер функционирования системы. Авторы [6] определяют динамическую систему как структурированный объект, в который периодически можно вводить и из которого можно выводить вещество, энергию и информацию. Это свидетельствует о том, что такая система обязательно должна иметь вход и выход.

Описание такой системы в виде единого вероятностного процесса было бы слишком громоздким. Поэтому напрашивается решение, связанное с моделированием каждой отдельной подсистемы и дальнейшей увязкой их между собой. Анализ такой системы, определение её структуры и основных параметров возможно за счёт использования математических имитационных моделей.

При выборе схемы формализации процесса функционирования СПС очень важно учесть два принципиальных момента: 1. Получить наиболее простую модель процесса функционирования системы; 2. Добиться как можно более точных результатов расчёта. В нахождении компромисса между этими двумя противоречивыми условиями и состоит задача оптимального моделирования.

Унифицированная имитационная модель функционирования различных систем может быть представлена в виде стандартной математической схемы – агрегата [7–8]. Такая схема предназначена для изучения сложных структур, состоящих из элементов, представленных динамическими системами в широком понятии: непрерывно-детерминированными, дискретно-детерминированными, дискретно-стохастическими и непрерывно-стохастическими.

В качестве математического описания модулей для ремонта вагонов попытаемся воспользоваться моделью кусочно-линейного агрегата (КЛА) [7–9]. КЛА представляет собой частный случай динамической стохастической системы с дискретным казуальным вмешательством.

КЛА принадлежит к категории объектов, которые можно представлять в виде преобразователя информации (рис. 1). Он функционирует во времени $t \in T$, может получать входные сигналы x со значениями из некоторого множества X, посылать выходные сигналы y со значениями из некоторого множества Y и находиться в определённые моменты времени в некотором состоянии z из некоторого множества Z.

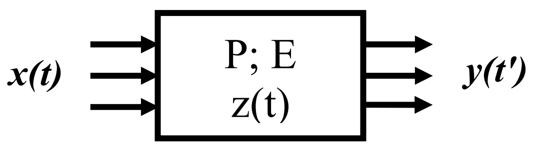

Рис. 1. Общий вид кусочно-линейного агрегата

Динамике КЛА присущ «событийный» характер. Все события будем делить на две группы: внутренние и внешние. Внутренние события состоят в достижении траекториями КЛА некоторого подмножества состояний $z^* \in Z$, внешние – в получении входного сигнала.

Как уже было отмечено ранее, КЛА имеет вход и выход. На вход КЛА в дискретные моменты времени t_i поступают входные сигналы. Будем считать, что длительность сигнала очень незначительная – практически мгновенная. В качестве поступающих сигналов может быть информация о том, что перед обслуживающим каналом появилось требование (ремонтируемый вагон), которое нуждается в обслуживании или, например, что требование уже поступило в обслуживающий канал, и он может приступать к обслуживанию.

На выход КЛА поступают выходные сигналы. Выходной сигнал $y(t')$ принадлежит множеству Y, $y(t') \in Y$. В качестве выходного сигнала может быть, например, информация о том, что канал закончил обслуживание требования или, например, требование покинуло канал (РМ свободен). В нашем случае требование не всегда сразу же покидает канал после обслуживания – должно быть свободное место в очереди к следующему каналу.

КЛА в промежутке между дискретными значениями времени поступления сигналов может находиться в одном из возможных состояний: 1. Агрегат находится в стадии ожидания поступления требования (вагона); 2. Агрегат находится в стадии обслуживания требования; 3. Агрегат уже обслужил требование и находится в стадии ожидания, когда оно покинет агрегат; 4. Требование находится в агрегате, но агрегат его не обслуживает по причине отказа (поломки); 5. Агрегат находится в стадии ремонта, требование в агрегате отсутствует.

Ремонтный модуль (РМ) представляет собой одноканальную систему массового обслуживания (СМО) с неограниченным ожиданием. Правда, в отличие от обычных «классических» СМО, когда требование может без особых проблем стать в очередь на обслуживание или легко покинуть систему после обслуживания, данная СМО имеет ряд специфических особенностей. Например, учитывая большие габариты требований (ремонтируемые вагоны), не всегда может быть в наличии необходимое количество мест для ожидания или, например, не всегда может быть готовым транспортное средство, предназначенное для перемещения требований. Это всё накладывает дополнительные условия на её функционирование. Есть и другие особенности.

Представим СМО в виде кусочно-линейного агрегата. КЛА являет собой частный случай стохастической динамической системы с дискретным казуальным вмешательством.

КЛА функционирует следующим образом. В дискретные моменты времени t_i перед КЛА появляются требования на обслуживание. Каждое требование характеризуется параметром a. Если агрегат свободен, то требование начинает обслуживаться. Если агрегат занят, то требование становится в очередь. В общем случае, когда имеется несколько агрегатов, расположенных параллельно, то требование ожидает, какой из агрегатов освободиться раньше.

Состояние КЛА в момент времени $t \in T$ будем обозначать вектором $z(t) \in Z$, где Z – множество состояний КЛА. Переход КЛА из состояния $z_1(t)$ в состояние $z_2(t)$ и так далее происходит за очень непродолжительный момент времени, практически равный нулю, т.е. - скачкообразно. Момент скачка определяется входными сигналами $x(t) \in X$ и внутренними параметрами самого КЛА, $g(t) \in G$.

Будем считать, что в начальный момент времени $t_н \in T$ система пребывает в начальном состоянии $z_н \in Z$, где $z_н$ – точка, находящаяся внутри замкнутого n-мерного эвклидова пространства Z. Проследим за изменением состояния системы от действия внутренних причин. Под действием этих причин система может переходить из состояния $z_н$ в другие состояния $z_t \in Z$, совершая движения $z(t)$, где $t > t_н$. Точка

z_t будет перемещаться в пространстве до тех пор, пока не выйдет на границу области Z. Момент времени выхода на границу обозначим через t^*.

Для всех t совокупность (t, z_t) таких, что $t_н \le t \le t^*$, а $z_t = z(t)$ представляет собой фрагмент движения на отрезке $(t_н, t^*)$. Этот фрагмент движения назовём перемещением точки z_t внутри пространства Z. Для задания этого перемещения следует указать соотношения, которые определяют z_t для $t \in (t_н, t^*)$ по заданным значениям $t_н$ и $z_н$.

Для определения момента t^* и самого состояния системы в этот момент $z(t^*)$ следует решить совместно уравнения движения точки и уравнения, которые описывают границу пространства состояний Z.

Моменты времени получения входных или выдачи выходных сигналов назовём «контрольными» моментами времени t^*. А состояния КЛА в контрольные моменты времени – «критическими» состояниями $z(t^*)$. После «критического» состояния КЛА скачком может перейти в новое состояние.

В основу формализации общей схемы процесса функционирования системы положим следующие принципы: 1. Система функционирует во времени и в каждый момент времени может находиться в одном из возможных состояний; 2. На вход системы поступают сигналы; 3. Система может подавать выходные сигналы; 4. Состояние системы в некоторый момент времени определяется предыдущим состоянием системы, а также входными сигналами, которые поступили в данный момент времени и ранее; выходной сигнал в некоторый момент времени определяется состояниями системы и входными сигналами, относящимися к настоящему и предыдущим состояниям. Попытаемся дать формальную интерпретацию каждому принципу.

КЛА в дискретные моменты времени $t^*_{вых}$ подаёт выходные сигналы y. Выходной сигнал y принадлежит множеству Y, $y \in Y$ и определяется по состоянию агрегата $z(t)$ при помощи оператора выхода E.

Кроме состояния $z(t)$, будем также рассматривать и состояние $z(t+0)$. Условимся, что для всякого $(t_1 > t)$ момент $(t+0)$ находится в полуинтервале $(t, t_1]$. Для любого момента времени t состояние агрегата $z(t)$ может быть получено по предыдущим состояниям с помощью случайного оператора перехода P.

В начальный момент времени $t_н$ система находится в состоянии $z_н$. Будем считать, что процесс функционирования агрегата в момент поступления входного сигнала x описывается подоператором перехода P_1. Поэтому в момент прихода в агрегат $t^*_{вх} \in$ T входного сигнала x состояние системы можно определить следующим образом: $z(t^*_{вх}+0) = P_1[t^*_{вх}, z(t^*_{вх}), x]$.

Если полуинтервал времени $(t^*_{вх1}, t^*_{вх2}]$ не содержит моментов поступления входных сигналов, кроме $t^*_{вх2}$, то для $t \in (t^*_{вх1}, t^*_{вх2}]$ состояние КЛА определяет подоператор P_2, $z(t) = P_2[t, t^*_{вх1}, z(t^*_{вх1}+0)]$.

Оба подоператора P_1 и P_2 рассматриваются как совокупный оператор перехода КЛА в новое состояние.

Рассмотрим работу оператора выхода E. Представим его в виде двух подоператоров E_1 и E_2. Подоператор E_1 определяет моменты выдачи выходных сигналов, а подоператор E_2 – их содержание.

Момент подачи выходного сигнала определяется следующим порядком. Пусть задано подмножество состояний агрегата Z_y, при достижении которых он должен посылать выходной сигнал. Подоператор E_1 представляет характеристическую функцию подмножества Z_y: если $z(t) \in Z_y$, то $E_1 = 1$, а если $z(t) \notin Z_y$, то $E_1 = 0$. Поэтому математическая модель формирования выходного сигнала будет иметь вид

$$y(t') = E_1[t^*_{вых}, z(t^*_{вых}), Z_y]\, E_2[t^*_{вых}, z(t^*_{вых})].$$

Учитывая всё выше изложенное, под кусочно-линейным агрегатом (КЛА) будем иметь ввиду некий объект, представляемый совокупностью множеств T, X, Y, Z, Z_y, G и случайными операторами P и E.

Известно, что каждая ремонтная позиция представляет собой систему массового обслуживания [4]. В общем случае СМО состоит из двух подсистем: подсистемы ожидания обслуживания и подсистемы самого обслуживания. Для нашего случая, когда требованиями выступают крупногабаритные физические объекты – вагоны, должны быть предусмотрены соответствующие площади, на которых могли бы размещаться вагоны в период ожидания обслуживания и площади, на которых осуществляется само обслуживание.

Представим схему КЛА также в виде системы, состоящей из двух подсистем: подсистемы ожидания и подсистемы обслуживания. Подсистема обслуживания является основной подсистемой, а подсистема ожидания – вспомогательной. Каждое требование, чтобы получить обслуживание, обязательно должно пройти через подсистему обслуживания. В подсистему ожидания, требование попадает только в том случае, если в момент его поступления в систему, подсистема обслуживания оказывается занятой.

Ремонтный модуль представим в виде одноканальной системы массового обслуживания с неограниченным временем ожидания. Требование будет находиться в очереди до тех пор, пока не попадёт на обслуживание. Покидать систему без обслуживания требование не имеет права. Продолжительность обслуживания требования является случайной величиной τ с заданной плотностью распределения $f(\tau)$.

Состояние КЛА $z(t)$ будем образно представлять точкой в многомерном пространстве. Изменение хотя бы одной координаты мгновенно изменяет положение точки и, таким образом, изменяет состояние всей системы.

При описании ремонтных модулей поточной линии в виде кусочно-линейных агрегатов будем считать, что основное состояние соответствует количеству требований (вагонов), находящихся в системе. А вектор дополнительных координат содержит информацию, которая необходима для вычисления дальнейшего протекания процесса $z(t)$.

Возьмём в качестве состояния КЛА пару v, z_v, т.е. $z = (v, z_v)$. Параметр v назовём дискретной составляющей состояния или основным состоянием, а z_v – вектором вспомогательных координат. Дискретная составляющая v показывает общее количество требований (вагонов), находящихся в системе (на обслуживании и в ожидании обслуживания), $v = (0, 1, 2,\ldots, k)$. Максимальная величина этого параметра в общем случае определяется количеством обслуживающих каналов n на позиции и вместимостью зоны ожидания перед позицией l; $k = (n + l)$. Параметр v может изменяться с единичной скоростью в сторону уменьшения или увеличения. Вектор z_v может иметь следующие координаты: $z_v = (\xi, \zeta)$, где $\xi = (\xi_1, \xi_2, \ldots \xi_n)$ и $\zeta = (\zeta_1, \zeta_2, \ldots \zeta_l)$, а

ξ_1 – время, оставшееся до окончания обслуживания требования первым каналом;

ξ_2 – время, оставшееся до окончания обслуживания требования вторым каналом;

……………………………………….

ξ_n – время, оставшееся до окончания обслуживания требования n-м каналом;

ζ_1 – время, оставшееся до начала обслуживания первого требования в очереди;

ζ_2 – время, оставшееся до начала обслуживания второго требования в очереди;

………………………………………….

ζ_l – время, оставшееся до начала обслуживания l-го требования в очереди;

В момент времени, когда ξ_k станет равным нулю ($k = 1, 2,\ldots, n$), т.е. обслуживание требования k каналом окончено, происходит изменение состояния системы (скачок). В этот момент дискретный параметр уменьшается на единицу $v' = v - 1$(обслуженное требование покидает систему). КЛА посылает выходной сигнал о том, что обслуживающий канал свободен. Аналогично, когда ζ_1 станет равным нулю (первое требование из очереди начало обслуживаться), также происходит изменение состояния системы (скачок).

Таким образом, математическая схема кусочно-линейного агрегата может быть положена в основу при разработке имитационных моделей работы гибких поточных линий для ремонта вагонов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дударев, А. Е. Применение имитационного моделирования для анализа функционирования поточных вагоноремонтных линий с гибкими связями между производственными участками [Текст] / А. Е. Дударев, В. В. Мямлин. – Д., 1986. – 16 с. – Деп. в ЦНИИ ТЭИ МПС 30.06.86, № 3582.
2. Мямлин, В. В. Использование ЭВМ для анализа функционирования различных поточных линий для ремонта вагонов [Текст] / В. В. Мямлин // Железнодорожный транспорт. Серия «Вагоны и вагонное хозяйство». Ремонт вагонов. – Вып. 1. – М.: ОИ/ЦНИИ ТЭИ МПС, 1989. – С. 1-11.
3. Мямлин, В. В. Применение теории сложных систем к исследованию работы поточных линий для ремонта вагонов [Текст] / В. В. Мямлин // Транспортные связи. Проблемы и перспективы: Докл. Межд. науч.-практ. конф. (Днепропетровск, 29.05 – 30.05.2008). – Д., 2008. – С. 8.
4. Мямлин, В. В. Моделирование работы гибких поточных линий для ремонта вагонов как многофазных многоканальных систем массового обслуживания [Текст] / В. В. Мямлин // Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта: Тезисы 68 Межд. науч.-практ. конф. (Днепропетровск, 22.05-23.05.2008). – Д., 2008. – С. 51-52.
5. Мямлин, В. В. Совершенствование поточного метода ремонта вагонов за счёт гибкости транспортной системы между технологическими модулями [Текст] / В. В. Мямлин // Залізн. трансп. України. – 2008. – № 4. – С. 15-17.
6. Калман, Р. Очерки по математической теории систем [Текст] / Р. Калман, П. Фалб, М. Арбиб. – М.: Мир, 1971. – 214 с.
7. Бусленко, Н. П. Моделирование сложных систем [Текст] / Н. П. Бусленко. – М.: Наука, 1978. – 400 с.
8. Бусленко, Н. П. Лекции по теории сложных систем [Текст] / Н. П. Бусленко, В. В. Калашник, И. Н. Коваленко. – М.: Советское радио, 1973. – 440 с.
9. Бусленко, В. Н. Автоматизация имитационного моделирования сложных систем [Текст] (Серия «Библиотечка программиста») / В. Н. Бусленко. – М.: Наука, 1977. – 240 с.

Поступила в редакцию 29.08.2008.