

## СХЕМА КУСОЧНО-ЛИНЕЙНОГО АГРЕГАТА КАК МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ АСИНХРОННОГО ГИБКОГО ПОТОКА РЕМОНТА ВАГОНОВ

Запропоновано варіант компоновки підприємства, яке використовує асинхронний гнучкий потік ремонту вагонів. Розглянуто метод формалізації процесу функціонування технологічних модулів асинхронного гнучкого потоку ремонту вагонів. В якості математичної схеми функціонування технологічних модулів запропонована загальна схема шматочно-лінійного агрегату. Ця математична схема може бути в подальшому покладена в основу розробки різних імітаційних моделей, використовуваних при проектуванні та дослідженні асинхронних гнучких потоків ремонту вагонів.

Предложен вариант компоновки предприятия, использующего асинхронный гибкий поток ремонта вагонов. Рассмотрен метод формализации процесса функционирования технологических модулей асинхронного гибкого потока ремонта вагонов. В качестве математической схемы функционирования технологических модулей предложена общая схема кусочно-линейного агрегата. Данная математическая схема может быть в дальнейшем положена в основу разработки различных имитационных моделей, используемых при проектировании и исследовании асинхронных гибких потоков ремонта вагонов.

A variant of configuration of an enterprise using the asynchronous flexible stream of repair of wagons is suggested. A method of formalization of a process of functioning the technologic modules of asynchronous flexible stream of repair of wagons is considered. A general scheme of segment-linear aggregate as a mathematical scheme of functioning the technologic modules is proposed. The given mathematical scheme can be further a basis for development of various imitation models used in design and study of the asynchronous flexible stream of repair of wagons.

Основная проблема, возникающая при организации поточно-конвейерных линий (ПКЛ) для ремонта вагонов в существующих депо, связана с соблюдением жёсткого такта. Для этого необходимо, чтобы выполнение ремонтных операций на всех позициях оканчивалось одновременно. Поэтому требуется точная синхронизация времени выполнения ремонтных работ между отдельными позициями линии.

Вместе с тем вагоноремонтная среда, даже при одном и том же типе ремонтируемых вагонов, весьма разнообразна. Трудоёмкости ремонтируемых вагонов варьируют в очень широких пределах. Это сказывается на работе существующих «жёстких» ПКЛ, которые очень чувствительны к любому нарушению принятого такта линии. Как показывает многочисленный опыт, добиться чёткой синхронизации работ из-за огромного количества случайных факторов, присущих ремонтной среде и влияющих на трудоёмкости ремонта вагонов, не представляется возможным. Это приводит к тому, что на одних позициях работы ещё не закончены, а на других – рабочие и оборудование уже простаивают. Поэтому многие вагонные депо возвращаются к стационарному методу ремонта вагонов.

Тем не менее, подчеркнём, что альтернативы поточному методу нет. Поточный метод – это не просто одна из форм организации технологического процесса, а закономерный результат эволюции производственных систем. Он является более производительным, т.к. способствует разделению труда и широкому внедрению средств механизации и автоматизации производственных процессов.

Известно, что чем выше уровень системности, тем система более стабильна и лучше приспособлена к выполнению возложенных на неё функций [1].

Согласно принципу разнообразия [2], противостоят разнообразию среды, которую ремонтируют, может только разнообразие среды, которая ремонтирует. Одним из таких решений для среды, которая ремонтирует, является асинхронный гибкий поток.

Асинхронный гибкий поток ремонта вагонов (АГПРВ) представляет собой следующий, более эффективный этап в совершенствовании и развитии поточного ремонтного производства, обладающий громадными потенциальными возможностями. При его создании требуется использование более точных методов проектирования и строительства. АГПРВ может быть

получен в результате трансформации «классических» поточных линий за счёт изменения их структуры и связей между элементами. АГПРВ имеет более высокий уровень системности по сравнению с существующими поточно-конвейерными линиями (ПКЛ).

До настоящего времени при проектировании вагонных депо основные параметры ПКЛ рассчитывались при помощи небольшого количества простых «классических» формул, которые совершенно не учитывали вероятностную природу ремонтного производства.

Сейчас же единственным методом исследования и синтеза поточного вагоноремонтного производства, как сложной организационно-технической системы, на стадии его проектирования, является имитационное моделирование. Качество результатов имитационного моделирования напрямую зависит от адекватности имитационной модели исследуемому процессу. Поэтому вопросам разработки и совершенствования имитационных моделей следует уделять самое пристальное внимание.

Асинхронный поток с гибкой системой транспортировки вагонов представляет собой следующий уровень эволюции вагоноремонтного поточного производства, требующий ещё более совершенных методов его проектирования, исследования и управления им.

Известно, что каждая сложная система состоит из отдельных элементов, взаимодействующих между собой определённым образом [1]. В качестве элементов поточных линий для ремонта вагонов (с жёсткими или полужёсткими связями) обычно принято выбирать ремонтные позиции.

При размещении элементов поточной линии иным образом и изменении связей между ними изменяется и сама структура системы, что влечёт за собой появление новых свойств системы [3 – 5]. Эти свойства открывают новые возможности, которые проявляются в лучшей адаптации к ремонтной среде по сравнению с «классическими» поточными линиями.

АГПРВ, как и любой поток, состоит из ряда производственных участков (фаз), на каждом из которых, согласно технологическому процессу, выполняются определённые комплексы операций. Но, в отличие от обычных ПКЛ, при АГПРВ используются некоторые вспомогательные элементы, которые самым непосредственным образом способствуют повышению гибкости системы и увеличению её надёжности, что сказывается на её производительности.

Представим каждый элемент системы в виде соответствующего технологического модуля.

Все технологические модули, которые входят в структуру ремонтного потока, по функциональному назначению можно разделить на три группы. Первая группа – это ремонтные модули (РМ), которые непосредственно осуществляют ремонт вагонов. Вторая группа – это буферные модули или модули для ожидания (ОМ), которые служат для выравнивания неравномерности движения объектов ремонта между РМ.

Третья группа – это транспортные модули (ТМ), которые служат для транспортировки объектов ремонта между остальными модулями.

На рис. 1 представлен один из возможных вариантов схематичной компоновки предприятия, использующего асинхронный гибкий поток ремонта вагонов. При этом варианте АГПРВ размещён в трёх параллельных пролётах. В отличие от обычных вагонных депо, в которых объекты ремонта расположены вдоль пролётов цеха, здесь вагоны расположены поперёк цеха. В крайних пролётах шириной по 24 м расположены РМ и ОМ. В среднем пролёте шириной 18 м расположены ТМ. Такое компактное расположение позволяет ТМ одновременно обслуживать модули, находящиеся в разных пролётах. Стрелками показано направление входа и выхода вагонов из цеха.

Под ремонтным модулем (РМ) будем понимать обособленный производственный комплекс, занимающий часть территории специализированного участка, необходимой для размещения одного вагона, оснащённый специальным технологическим оборудованием, укомплектованный производственным персоналом и предназначенный для выполнения определённого перечня технологических операций. Ремонтные модули отдельных производственных участков различаются между собой комплексами, выполняемых технологических операций, составом оборудования и персонала. Ремонтные модули одного участка полностью идентичны между собой.

Под модулем для ожидания (ОМ) будем понимать специальное место, предназначенное для временного размещения одного вагона. Эти модули являются «запасным вариантом» в случае «сбоя» технологического процесса. Они выступают как бы в роли буфера, смягчающего неравномерное движение объектов ремонта между участками, вследствие значительного разброса объёмов ремонтных работ. Например, в случае, если один из РМ  $j$ -й фазы закончил обслуживание требования и необходимо освободить место для нового требования, стоящего

в очереди, а все РМ следующей  $(j+1)$ -й фазы заняты, то в этом случае требование, обслуженное в  $j$ -й фазе, может поступить в свободный ОМ. В отличие от РМ, ОМ не оснащён никаким технологическим оборудованием, не укомплектован никаким производственным персоналом и никакие работы в нём не предусмотрены.

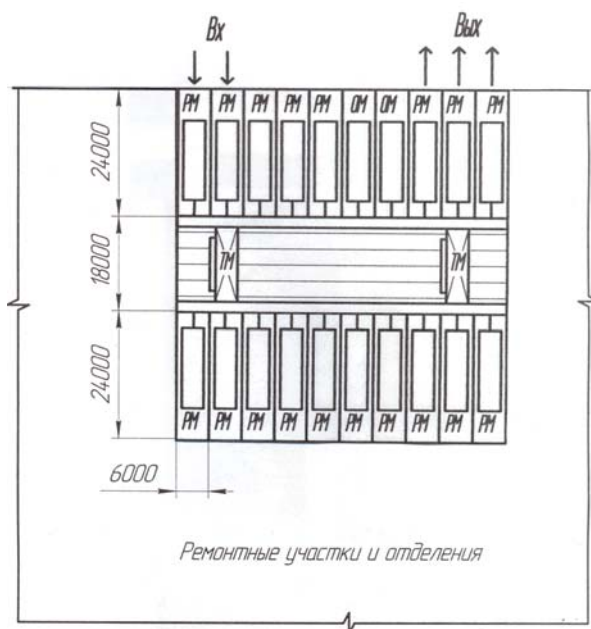


Рис. 1. Схематичный вариант компоновки предприятия, использующего асинхронный гибкий поток ремонта вагонов

Под транспортным модулем (ТМ) понимается мобильное транспортное средство (транспортная тележка), предназначенное для перемещения одного вагона между РМ и ОМ.

Все эти модули одновременно участвуют в технологическом процессе. В любом модуле может находиться только один вагон. Если пользоваться терминологией теории массового обслуживания [6], то по сути дела, каждый ремонтный модуль является одноканальной системой массового обслуживания. Весь же асинхронный гибкий поток ремонта вагонов представляет собой многофазную многоканальную систему массового обслуживания. В процессе обслуживания каждое требование (вагон) проходит последовательно через одни и те же ремонтные участки (фазы), но через разные РМ (каналы).

Рассмотрим процесс функционирования АГПРВ при помощи теории агрегатов и представим каждый модуль в виде кусочно-линейного агрегата (КЛА) [7 – 9]. В работах [10, 11] автор уже ранее обращался к этой теме.

КЛА является динамической дискретно-непрерывной системой и постоянно участвует в определённом процессе. Динамика КЛА, в общем случае, определяется скачками состояний в моменты поступления входных сигналов и внутренними изменениями состояний самого КЛА. Моменты достижения системой граничного состояния будем называть критическими моментами времени, так как в эти моменты времени система переходит из одного состояния в другое (происходит скачок) и будем их обозначать  $t^*$ .

Для элементов, входящих в состав АГПРВ, из общей схемы агрегата может быть выделена схема кусочно-линейного агрегата (КЛА), представляющая собой вариант динамической системы с дискретным казуальным вмешательством.

Дадим более подробное описание КЛА. Под КЛА будем понимать информационный преобразователь, который имеет вход и выход. КЛА функционирует во времени  $t \in T$ . На вход он получает сигналы  $x$  со значениями из некоторого множества  $X$ ,  $x \in X$ . С выхода посылает сигналы  $y$ ,  $y \in Y$ . В определённые моменты времени  $t$  находится в некотором состоянии  $z$  из некоторого множества  $Z$ ,  $z \in Z$ .

Все события, которые воспринимает КЛА, можно разделить на две группы – внешние и внутренние. Внешние события заключаются в получении входящего сигнала, а внутренние – в достижении траекториями КЛА определённого подмножества состояний  $Z^* \in Z$ . Таким образом, динамике КЛА характерен «событийный» принцип функционирования. Все сигналы происходят в дискретные моменты времени. В промежутке между сигналами КЛА находится в одном из возможных состояний  $z \in Z$ . Состояние КЛА в некоторый момент времени  $t \in T$  будем обозначать  $z(t) \in Z$ . При этом будем считать, что переход КЛА из одного состояния, например,  $z_1(t)$  в состояние, например,  $z_2(t)$  происходит мгновенно, т.е. скачкообразно. Время скачка  $t^*$  определяется параметрами входных сигналов  $x(t) \in X$  и параметрами внутренних процессов, происходящих в самом КЛА.

Всё множество возможных состояний КЛА является фиксированным набором отдельных непересекающихся подмножеств  $Z_v$ , где  $Z_v$  – многогранник в  $v$ -мерном евклидовом пространстве. Состояние КЛА  $z(t)$  условно можно изобразить в виде точки в многомерном пространстве, которая имеет множество координат. Изменение любой координаты моментально

изменяет положение точки и, тем самым, состояние всей системы.

Состояние КЛА будем рассматривать в виде  $z = (v, z_v)$ , где  $v$  – дискретная составляющая состояния, а  $z_v$  – вектор вспомогательных координат (точка многогранника  $Z_v$  с координатами  $z_{v1}, z_{v2}, \dots, z_{vn}$ ), т.е.  $z_v = (z_{v1}, z_{v2}, \dots, z_{vn})$ .

Схема функционирования РМ как КЛА представлена на рис. 2.



Рис. 2. Схема функционирования РМ как кусочно-линейного агрегата

Перед каждым РМ  $j$ -й фазы имеется очередь, состоящая из требований, нуждающихся в обслуживании. Специфика данного подхода состоит в том, что не сами требования посылают сигналы, а их посылают соответствующие технологические модули, в которых находятся требования, уже прошедшие обслуживание в предыдущей  $(j - 1)$ -й фазе. Кроме того, как будет показано в дальнейшем, сигналы от всех требований воспринимают только ТМ, а затем сами они посылают сигналы, которые уже непосредственно воспринимают РМ и ОМ.

Когда РМ свободен, он подаёт выходной  $y_1(t)$ , свидетельствующий о том, что он готов принять к обслуживанию новое требование.

Входящий сигнал  $x(t)$  поступает в КЛА в момент прибытия очередного требования на обслуживание. В этот же момент КЛА посылает выходной сигнал  $y_2(t)$ , говорящий о том, что РМ занят. Продолжительность обслуживания требования  $\tau_{обсл}$  является случайной величиной с заданным законом распределения  $f(\tau)$ . В формуле состояния КЛА она представляет дополнительную координату  $z_v$  – время, оставшееся до окончания обслуживания. В тот момент, когда требование будет обслужено, КЛА подаёт выходной сигнал  $y_3(t)$ , оповещающий о том, что требование уже обслужено, но канал ещё занят. В этот момент дискретный параметр  $v$  не изменяется, так как требование ещё не покинуло систему. Только после того, как требование покинет агрегат, дискретный параметр уменьшается на единицу  $v = v - 1$ .

Схема функционирования ОМ отличается от РМ практически только тем, что он не выдаёт сигнал  $y_3(t)$  и  $\tau_{обсл} = 0$ .

Схема функционирования ОМ как КЛА представлена на рис. 3.

В ОМ требование поступает в том случае, если РМ  $j$ -й фазы закончил обслуживание тре-

бования, в очереди к нему уже стоит новое требование, а РМ следующей  $(j + 1)$ -й фазы ещё не освободились. Поэтому из этого РМ  $j$ -й фазы обслуженное требование поступает в ОМ для кратковременного ожидания, пока не освободится РМ  $(j + 1)$ -й фазы, а на освободившееся место поступает требование, прошедшее обслуживание в РМ  $(j - 1)$ -й фазы. Каждый ОМ может поочерёдно принимать для «обслуживания» требования, находящиеся в любой стадии технологического процесса. Поступление требований в ОМ является вынужденным, а не обязательным условием.

Состояние ОМ определяется параметром  $v$ , который принимает два значения:  $v = 1$ , когда в ОМ находится требование, и  $v = 0$ , когда требования в нём нет (канал свободен). ОМ воспринимает входные сигналы и посылает выходные сигналы. Входной сигнал он получает в момент поступления в него требования. В этот же момент он посылает выходной сигнал о том, что он занят. Можно считать, что продолжительность обслуживания требования в ОМ равна нулю. После того, как «обслуживание» требования закончено, оно остаётся в ОМ до тех пор, пока не освободится необходимый РМ.

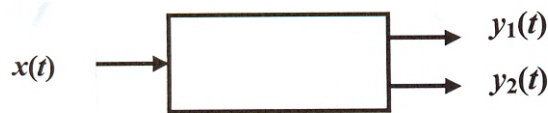


Рис. 3. Схема функционирования ОМ как кусочно-линейного агрегата

Ещё раз подчеркнём, что ни РМ, ни ОМ не определяют, какое из требований будет поступать к ним на обслуживание. Эту функцию целиком выполняет ТМ на основе поступающих к нему сигналов от РМ и ОМ. В случае, когда сигнал одного модуля совпадает в технологическом аспекте с сигналом другого модуля, то ТР принимает требование на обслуживание. Обслуживание состоит в перемещении требования либо из РМ в РМ, либо из РМ в ОМ, либо из ОМ в РМ.

Одним словом, ТМ, формализованный в виде КЛА, должен из всего множества, поступающих на его вход сигналов, отыскать некую пару сигналов от модулей, также представленных в виде КЛА, между которыми выполнялось бы определённое условие.

В первую очередь. ТМ должен реагировать на соответствующие сигналы пары  $PM_j^+ - PM_{(j+1)}^-$ , во вторую – на сигналы пары  $OM_j^+ - PM_{(j+1)}^-$ , в третью – на сигналы пары

$PM_j^+ - OM^-$ . Здесь:  $PM_j^+$  – сигнал от ремонтного модуля  $j$ -го участка о том, что он закончил обслуживание требования;  $PM_{(j+1)}^-$  – сигнал от ремонтного модуля  $(j + 1)$ -го участка о том, что он свободен и готов приступить к обслуживанию нового требования;  $OM_j^+$  – сигнал от модуля для ожидания, в котором находится требование, которое было обслужено на  $j$ -м участке;  $OM^-$  – сигнал от модуля для ожидания о том, что он свободен. В общем случае, в момент времени, когда требование покидает модуль, сигнал «+» меняется на сигнал «-». Когда требование поступает в модуль, сигнал «-» меняется на сигнал «+».

Схема функционирования ТМ как КЛА представлена на рис. 4.

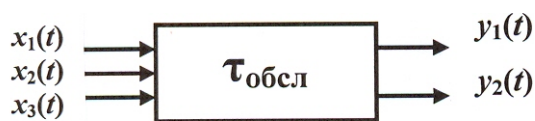


Рис. 4. Схема функционирования ТМ как кусочно-линейного агрегата

На вход ТМ, представленного в виде КЛА, поступает общий поток сигналов  $x(t)$  от других технологических модулей. Среди этого общего потока можно выделить три самостоятельных потока. Так, поток входящих сигналов  $x_1(t)$  сообщает о свободных модулях, поток  $x_2(t)$  – о занятых модулях и поток  $x_3(t)$  – о модулях, окончивших обслуживание требований. На основании этих сигналов ТМ принимает решение, от какого модуля принять требование и, на какой модуль его передать. В момент принятия решения КЛА посылает выходной сигнал  $y_2(t)$ , оповещающий о том, что ТМ занят. Этот сигнал нужен для другого ТМ. Продолжительность обслуживания требования  $\tau_{обсл}$  является случайной величиной с заданным законом распределения  $f(\tau)$ . После того, как требование будет обслужено, КЛА посылает выходной сигнал  $y_1(t)$ , свидетельствующий о том, что он свободен. После этого всё повторяется.

Таким образом, мы можем сделать вывод, что схема кусочно-линейного агрегата адекватно отражает суть процессов, которые могут происходить при функционировании перспективного вагоноремонтного производства и может найти широкое применение при исследовании с помощью имитационного моделирования асинхронных гибких потоков ремонта вагонов ещё на стадии их проектирования.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Перегудов, Ф. И. Введение в системный анализ [Текст] / Ф. И. Перегудов, Ф. П. Тарасенко. – М.: Высш. шк., 1989. – 367 с.
2. Эшби, У. Р. Введение в кибернетику [Текст] / У. Р. Эшби. – М.: Изд-во ин. лит., 1959. – 432 с.
3. 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.
4. 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.
5. Мямлин, В. В. Повышение эффективности поточного метода ремонта вагонов путём использования специальных архитектурно-технологических решений, обеспечивающих гибкую связь между позициями [Текст] / В. В. Мямлин // Проблемы и перспективы развития вагоностроения: Материалы IV Всерос. науч.-практ. конф. (Брянск, 09.10-10.10.2008). – Брянск, 2008. – С. 76-78.
6. Новиков, О. А. Прикладные вопросы теории массового обслуживания [Текст] / О. А. Новиков, С. И. Петухов. – М.: Советское радио, 1969. – 400 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.
10. Мямлин, В. В. Использование теории кусочно-линейных агрегатов для формализации работы ремонтных модулей поточной вагоноремонтной линии с гибкой транспортной системой [Текст] / В. В. Мямлин // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2008. – Вып. 24. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2008. – С. 44-48.
11. Мямлин, В. В. Использование математической схемы агрегата для формализации процесса функционирования ремонтной позиции гибкой поточной линии для ремонта вагонов [Текст] / В. В. Мямлин // Проблемы и перспективы развития транспортных систем и строительного комплекса: Материалы II Межд. науч.-практ. конф. – Гомель: БелГУТ, 2008. – С. 172-173.

Поступила в редколлегию 23.12.2008.