

В. В. МЯМЛИН, С. В. МЯМЛИН (ДИИТ)

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ПОТОКА ДЛЯ РЕМОНТА ВАГОНОВ КАК МУЛЬТИФАЗНОЙ ПОЛИКАНАЛЬНОЙ МНОГОПРЕДМЕТНОЙ СИСТЕМЫ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

Наведено алгоритм імітаційного моделювання роботи гнучкого потоку ремонту вагонів як мультифазної поліканальної багатопредметної системи масового обслуговування.

Ключові слова: ремонт вагонів, гнучкий потік, алгоритм моделювання

Приведен алгоритм имитационного моделирования работы гибкого потока ремонта вагонов как мультифазной поликанальной многопредметной системы массового обслуживания.

Ключевые слова: ремонт вагонов, гибкий поток, алгоритм моделирования

The algorithm of computer simulation of the flexible flow for repair of cars as a multiphase polychannel many-object queuing system is presented. The basic operators of the model are given and their work is described.

Keywords: repair of cars, flexible flow, simulation algorithm

Одной из основных задач вагонных депо является повышение качества ремонта вагонов, которое напрямую связано с безопасностью движения поездов. Решать эту задачу можно за счёт улучшения технологии ремонта, создания новых конструкций технологического оборудования и совершенствования организации самого процесса ремонта. Именно анализу последнего направления и посвящена данная статья. Следует особо подчеркнуть, что вагоноремонтное производство относится к разряду производств, в которых революционные изменения происходят весьма редко, а внедрение отдельных мелких инноваций осуществляется крайне медленно. Кроме того, большое разнообразие существующих предприятий, отличающихся друг от друга номенклатурой ремонтируемых вагонов, программой ремонта, используемым технологическим оборудованием, схемой планировок, количеством позиций и т.п., сильно затрудняет внедрение передовых унифицированных технологий.

В настоящее время ни у кого не вызывает сомнений преимущество поточного способа производства. Однако те жёсткие структуры, которые были ранее реализованы при создании вагоноремонтного поточного производства, если поначалу и имели преимущество по сравнению со стационарным методом, то по сравнению с гибким потоком, они значительно проигрывают.

Основной проблемой существующих вагоноремонтных предприятий, тормозящей внедрение гибких производственных потоков, является принятая жёсткая структура участков, предполагающая строгое движение вагонов по одному и тому же заранее предопределённому маршруту.

Известно, что при использовании поточных методов ремонта вагонов на традиционных линиях с жёсткой структурой возникает серьёзная проблема, заключающаяся в том, что постоянно нарушается такт поточных линий, что сводит на нет все преимущества поточного способа производства. Это происходит из-за того, что трудоёмкости ремонта вагонов (даже одного и того же типа) сильно отличаются друг от друга. Получается так, что на каких-то позициях объёмы регламентированных ремонтных работ на вагонах уже выполнены, а на каких-то – ещё нет. Таким образом, происходит задержка перемещения всего потока, что негативно сказывается на загрузке оборудования и исполнителей. Кроме того, необоснованно увеличивается простой вагонов в ремонте, что влечёт за собой уменьшение пропускной способности поточных линий.

Практически всех этих недостатков лишены гибкие асинхронные потоки. Они имеют более высокую пропускную способность, так как позволяют производить индивидуальное перемещение каждого вагона с любого модуля j -ой позиции на любой модуль $(j + 1)$ -ой позиции, что намного снижает зависимость в перемещениях ремонтируемых вагонов друг от друга. Кроме того, гибкие производственные системы имеют возможность на одних и тех же специализированных позициях в режиме единого потока осуществлять ремонты даже разных типов вагонов.

Как показала практика, трудоёмкости ремонтируемых вагонов настолько сильно отличаются друг от друга, что соблюсти строгий такт между позициями не представляется возможным. Поэтому для того, чтобы соединить все преимущества поточного метода ремонта с

индивидуальностью каждого ремонтируемого вагона, необходимо использовать гибкую асинхронную систему, способную в едином технологическом потоке осуществлять ремонты вагонов с различными объёмами работ независимо друг от друга.

Исходя из многолетнего опыта, приверженность только жёсткому такту, для вагоноремонтного производства оказалась ошибкой. Любые мероприятия, сориентированные на достижение единого такта, по сути дела ни к чему существенному не приводят.

К достоинствам асинхронного гибкого потока следует отнести его неприхотливость к выбору объектов ремонта, как по типам вагонов, так и по объёмам выполняемых ремонтных работ. Минимальная зависимость ремонтируемых вагонов друг от друга. Ритмичная работа исполнителей на позициях без так называемых «авралов» и «штурмовщины». Все эти факторы прямо и косвенно способствуют улучшению качества ремонта вагонов.

Поэтому для возможности выполнения в будущем необходимых объёмов ремонта, вагоноремонтная отрасль нуждается в качественном инновационном скачке. О перспективах её развития нужно думать уже сейчас.

В имеющихся работах, связанных с проектированием вагоноремонтных предприятий, уделено недостаточно внимания методам расчёта и проектирования поточных линий [1 – 3]. Расчёт основных параметров поточного производства осуществляется лишь при помощи небольшого числа стандартных формул. При этом вероятностная природа ремонтного производства практически не учитывается. Что касается гибких вагоноремонтных потоков, то в этом вопросе, в отличие от машиностроения и приборостроения, имеется вообще существенное отставание. А ведь именно для ремонтного производства, носящего стохастический характер, наличие гибкости технологического процесса крайне необходимо. Поэтому рассматриваемое направление имеет актуальный характер.

В связи с этим, исходя из соображений эффективности производства, целый ряд предприятий Украины может быть перепрофилирован на обслуживание основного производства, а непосредственно полноценным ремонтом вагонов должны заниматься не более 20 вагонных депо, которые должны быть расширены, реконструированы, перевооружены. В тех депо, где это допустимо, имеет смысл использовать высокопроизводительные гибкие потоки. Не исключена возможность постройки и совершенно новых высокоэффективных вагоноремонтных

предприятий, полностью основанных на гибких ремонтных потоках. На необходимость обязательного использования гибких потоков при строительстве новых вагоноремонтных предприятий неоднократно указывается и в фундаментальном учебнике по вагонному хозяйству [4].

Новые ремонтные потоки требуют и новых методов расчёта. Произвести правильный выбор основных параметров поточного производства и выполнить точный расчёт основных его показателей можно только при помощи имитационного моделирования работы потока на ЭВМ. Впервые вопросы имитационного моделирования поточных линий как многофазных систем массового обслуживания были затронуты в работах [5 – 7]. В этих работах гибкие потоки рассматривались как однопредметные, т.е. предназначенные для ремонта только одного типа вагонов. В них ставилась задача просто показать преимущества гибких потоков перед жёсткими и полужёсткими поточными линиями при ремонте одного и того же типа вагонов. На самом же деле потенциальные возможности гибких потоков намного шире.

Целью данной работы является разработка методики расчёта гибких многопредметных потоков и определение оптимальных параметров их структуры при помощи имитационного моделирования на ЭВМ.

Исходя из того, что в процессе движения вагонов через все позиции потока возможны «обгоны» между ними, и вагон, поступивший в ремонт позже ранее зашедшего вагона, из ремонта может выйти значительно раньше. Поэтому в программе предусмотрен индивидуальный контроль за перемещением каждого вагона через все позиции потока. На входе каждому поступающему в ремонт вагону присваивается входящий номер, а на выходе определяется отклонение от очерёдности в ту или иную сторону. Таким образом, находясь в общем потоке, каждый вагон простаивает в ремонте столько времени, сколько требуется для его ремонта. Кроме того, определяется среднее время пребывания вагонов в ремонте и среднеквадратическое отклонение времени пребывания вагонов в ремонте.

При ремонте вагонов на потоке, представляющем собой сложную систему, происходит последовательная смена её состояний. Под сменой состояния будем иметь в виду начало или завершение любого процесса на одном из модулей. Это может быть начало ремонта вагона на любой позиции, окончание ремонта, освобождение модуля.

Предлагаемая модель имитационного моделирования рассматривает поток для ремонта вагонов как мультифазную поликанальную многопредметную систему массового обслуживания. Остановимся подробнее на терминологии данного потока.

Термин «**мультифазная**» свидетельствует о том, что система состоит из целого ряда последовательно расположенных позиций (фаз), $j = 1, 2, \dots, m$.

Термин «**поликанальная**» говорит о том, что каждая ремонтная позиция (фаза) может включать в себя определённое количество параллельно расположенных модулей (каналов), $n = 1, 2, \dots, n_j$. Все модули одной позиции тождественны между собой.

Под термином «**многопредметная**» понимается то, что на одном потоке могут одновременно ремонтироваться вагоны, входящие в группы разных категорий. Каждая такая группа вагонов имеет свои количественные и качественные составляющие. Под количественной составляющей подразумевается программа по ремонту вагонов данной группы. Под качественными – тип вагона и вид ремонта. Группы отличаются друг от друга разными признаками (тип вагона, вид ремонта). Таким образом, если, например, в ремонт поступают вагоны одного типа, но на них выполняются два разных вида ремонта, то мы имеем дело с двумя самостоятельными группами вагонов.

Как правило, каждое действующее вагонное депо специализировано на ремонте только одного типа вагона. Поэтому существует проблема, связанная с обеспечением депо объектами ремонта, – вагонов необходимого типа может и не оказаться в нужном количестве.

Совсем по-иному происходит отбор вагонов для гибких производственных систем. Исходя из того, что в ремонт могут поступать разные типы вагонов, отпадает проблема обеспеченности депо строго определёнными объектами ремонта.

Кроме уже отмеченных преимуществ, к достоинствам гибкого потока можно отнести и то, что он позволяет в режиме общего потока ремонтировать разные типы вагонов и выполнять разные виды ремонтов. Таким образом, поступающие в ремонт вагоны, делятся на определённые группы, отличающиеся друг от друга параметрами ремонтируемых объектов.

По каждой группе вагонов задаётся программа ремонта N_a , $a = 1, 2, \dots, z$.

Будем считать, что вагоны на входе (в очереди) есть всегда. При этом вагоны каждой группы поступают в ремонт случайным образом согласно заданной вероятности.

В качестве примера рассмотрим следующие группы вагонов, поступающие в ремонт (табл. 1).

Таблица 1

Программа, тип вагона и вид ремонта

№ п/п	Тип вагона	Вид ремонта	Программа ремонта	Вероятность поступления
1	Полувагон	ДР	3600	0,50
2	Полувагон	КР	360	0,05
3	Платформа	ДР	2160	0,30
4	Крытый	ДР	1080	0,15
			7200	1,0

Моделирование на ЭВМ процесса выбора группы вагона осуществляется следующим образом. Компьютер выбрасывает случайные числа ξ_i , равномерно распределённые в интервале от 0 до 1. Если случайно сгенерированное число попадает в интервал от 0 до 0,5 ($0 < \xi_i \leq 0,5$), то в ремонт поступает вагон из первой группы. Если случайное число попадает в интервал от 0,5 до 0,55 ($0,50 < \xi_i \leq 0,55$), то в ремонт поступает вагон из второй группы и т.д.

Для одной и той же группы вагонов могут задаваться условия (параметры), которые будут учитывать различные конструктивные особенности вагонов. Например, полувагоны могут быть с крышками люков, а могут быть и без крышек люков (глухонные). Эти конструктивные отличия сказываются на продолжительности ремонтных работ по вагонам и на маршрутах их движения через позиции потока.

Под приоритетом понимается то, что некоторым группам вагонов может отдаваться предпочтение. Эти вагоны ремонтируются в первую очередь, и по всему потоку им дан «зелёный свет». Если есть повышенная потребность на данный момент использования в перевозочном процессе, например, полувагонов, то этот тип вагонов становится приоритетным и ремонтируется в первую очередь, а вагоны остальных типов ремонтируются по мере возможности. В ремонт же вагоны поступают равномерно, согласно заданной программе.

Учитывая, что вагоноремонтное производство носит стохастический характер, оно практически не может быть точно рассчитано при помощи небольшого количества простых аналитических формул, а нуждается в использовании имитационного моделирования производственного процесса на ЭВМ.

Для решения указанных задач необходимо максимально использовать современные методы моделирования, которые позволяют в короткие сроки и с высокой точностью исследовать различные варианты проведения мероприятий по совершенствованию работы поточных линий вагоноремонтных предприятий.

С целью более глубокого анализа реальных ситуаций, с которыми могут столкнуться работники будущих предприятий, и с целью более точного расчёта таких видов производств ещё на стадии их проектирования, на кафедре «Вагоны и вагонное хозяйство» Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна разработан пакет прикладных имитационных программ «Гибкий вагоноремонтный поток».

При разработке программ использована среда приложений Microsoft Visual Studio 2010, а текст самих программ написан на алгоритмическом языке Visual Basic.

Интерфейс программного обеспечения позволяет в простой и доступной для пользователя форме задавать исходные данные для моделирования работы различных структурных вариантов потоков. Программы используются также в учебном процессе при разработке студентами курсовых и дипломных проектов по вагонному хозяйству.

Под структурой потока понимается количество ремонтных позиций, количество модулей на каждой позиции и логика взаимоотношения между ними.

Разработанные программы могут быть использованы для моделирования потоков с целью изучения различных факторов, влияющих на эффективность работы поточных линий ремонта вагонов и их показатели.

Согласно работам [8 – 10], гибкий поток может быть представлен в виде отдельных технологических участков. На каждом участке находятся специализированные ремонтные позиции, а на каждой позиции имеются модули. Под «модулем» понимается ремонтное место для одного вагона. Все модули одной позиции идентичны между собой и, таким образом, взаимозаменяемы.

В общем случае под процессом будем понимать изменение состояний системы во времени. В процессе функционирования гибких потоков возникает огромное количество различных состояний. Каждое новое состояние возникает в тот момент, когда в любом из модулей начинается либо заканчивается процесс ремонта вагонов.

Таким образом, каждый модуль может находиться в одном из трёх возможных состояний:

1. Модуль свободен (в нём нет вагона);
2. Модуль занят и работает (в нём находится вагон на котором выполняются ремонтные работы);
3. Модуль занят, но не работает (работы на вагоне уже закончены, но модуль он ещё не покинул).

Общее количество возможных состояний, в которых может находиться система, определяется по формуле

$$\Psi = Z^{\theta},$$

где Z – количество возможных состояний, в которых может находиться ремонтный модуль, $Z = 3$;

θ – количество ремонтных модулей.

Так, например, при количестве модулей равно 20, количество возможных состояний системы составит

$$\Psi = 3^{20} = 3486784401.$$

В отличие от обычной поточной линии для ремонта вагонов, представляющей собой многофазную одноканальную систему массового обслуживания (СМО), гибкий вагоноремонтный поток представляет собой мультифазную поликанальную систему массового обслуживания. В некоторых работах такие СМО носят ещё название сетей массового обслуживания [11].

Если в первом случае путь движения вагонов между позициями строго предопределён, то во втором случае маршрут движения ремонтируемых вагонов носит вероятностный многовариантный характер.

Максимальное количество возможных вариантов маршрута движения вагона между позициями потока определяется следующим образом:

$$S = \prod_{j=1}^m n_j,$$

где n_j – количество модулей на j -ой позиции, $j = 1, 2, \dots, z$. Так, например, при том же количестве ремонтных модулей и 4...6 позициях количество возможных вариантов маршрута перемещения вагона может колебаться от 500 до 1200. Для традиционных поточных линий количество возможных вариантов движения вагона по позициям измеряется только количеством ремонтных ниток (две нитки – два варианта, три нитки – три, и т.д.).

На каждой ремонтной позиции может находиться несколько ремонтных мест – модулей,

количество которых зависит от времени выполнения ремонтных работ на данной позиции. Чем продолжительнее работы, тем больше и модулей.

Таким образом, вагон с любого модуля j -ой позиции может попасть на любой освободившийся модуль $(j + 1)$ -ой позиции.

В процессе перемещения вагонов между отдельными позициями потока в результате воздействия различных случайных факторов возникают непредвиденные ситуации, которые могут негативно влиять на ход производственного процесса.

Для возможности глубже разобраться со случайными процессами, происходящими на позициях мультифазного поликанального потока в результате движения вагонов между ремонтными позициями, и узнать какие при этом могут возникать ситуации, чтобы принять соответствующие меры, лучше всего обратиться к имитационному моделированию.

Согласно [11], существует два способа реализации моделирования мультифазных систем: в квазирегулярном и вероятностном исполнении.

Квазирегулярная модель – это такая модель, в которой моделирование каждой фазы осуществляется индивидуально с расчётом усреднённых показателей, а затем рассчитываются общие показатели всей многофазной системы через показатели отдельных фаз.

Вероятностная модель – это модель, которая позволяет проследить движения каждого отдельного вагона в процессе прохождения его через все фазы системы. Общие показатели всей системы рассчитываются путём усреднения данных, полученных в результате последовательного прохождения каждого вагона через все фазы системы.

Один из возможных вариантов алгоритма моделирования работы поточной линии для ремонта вагонов с гибкими связями между позициями в квазирегулярном исполнении был изложен в работе [5].

В настоящей же работе представлена вероятностная имитационная модель. Эта модель позволяет проследить судьбу каждого отдельного вагона в процессе перемещения его между позициями потока с запоминанием промежуточных результатов и последующим расчётом различных показателей.

Процесс функционирования потока в упрощённом виде выглядит следующим образом.

Перед первой позицией имеется очередь из вагонов, ожидающих ремонта. Будем считать,

что вагоны в очереди есть всегда. Каждой a -й группе вагонов для каждой j -ой позиции задаются законы распределения времени выполнения ремонтных работ τ_{aj} , $j = 1, 2, \dots, m$; $a = 1, 2, \dots, z$.

В начальный момент времени все модули потока являются свободными. В момент начала моделирования один из операторов присваивает номер очередному вагону, поступившему на первую позицию потока, $i = i + 1$.

Как только будет освобождён любой из модулей первой позиции, в него сразу же поступает очередной вагон из очереди. Что касается других позиций, то для приёма очередного вагона будет использоваться тот модуль, который освободился раньше остальных.

Момент окончания ремонта вагона на позиции ещё не говорит о том, что вагон сразу же покинет эту позицию. Может так случиться, что все модули следующей позиции в этот момент будут ещё заняты, и вагону перемещаться будет некуда. Поэтому вагон будет оставаться в модуле до тех пор, пока не освободиться один из модулей следующей позиции.

При окончании ремонта вагона на последней позиции, он сразу же её покидает (будем считать, что место, куда поставить уже отремонтированный вагон есть всегда).

Будем также считать, что ремонт вагона начинается сразу же в момент поступления его на позицию.

Перемещение вагонов между ремонтными модулями производится при помощи трансбордерной тележки. Трансбордерная тележка осуществляет погрузку на себя вагона, перемещение вместе с ним к необходимому ремонтному модулю и выгрузку вагона. Таким образом, процесс перемещения вагонов между модулями занимает некоторое случайное время $\tau_{тр}$.

При функционировании гибких потоков может возникнуть огромное множество различных ситуаций, что требует разработки специального моделирующего алгоритма.

В самом начале моделирования происходит «разворачивание» потока. Первый вагон по позициям потока будет двигаться без каких-либо задержек, т.к. его движение ничем не ограничивается. Поэтому для получения более точных результатов необходимо снимать показатели, начиная с того момента, когда на всех позициях уже будут находиться вагоны.

Обозначения операторов использованы в соответствии с классической работой [12]:

Π – оператор ввода-вывода информации;
 A – вычислительный оператор;

P – логический оператор;
 Φ – оператор формирования случайной величины;

F – оператор формирования неслучайной величины;

H – оператор обнуления;

K – оператор подсчёта (счётчик);

$Я$ – оператор окончания вычислений.

Расположенный рядом с буквой индекс указывает порядковый номер оператора.

Опишем кратко работу алгоритма при помощи его основных операторов.

Для большей наглядности на рис. 1 представлена укрупнённая блок-схема алгоритма моделирования работы гибкого потока ремонта вагонов.

Оператор $П_1$ осуществляет ввод необходимой исходной информации. В качестве исходных данных вводятся следующие параметры:

T_m – интервал времени моделирования (равен годовому фонду рабочего времени потока), мин;

z – количество групп вагонов;

N_a – годовая программа по ремонту a -й группы вагонов, $a = 1, 2, \dots, z$;

m – общее количество ремонтных позиций на потоке;

n_j – количество ремонтных модулей на каждой j -ой позиции, $j = 1, 2, \dots, m$;

$f(\tau_{aj})$ – законы распределения времени выполнения ремонтных работ для каждой a -й группы вагонов по каждой j -ой позиции, $a = 1, 2, \dots, z; j = 1, 2, \dots, m$;

$\varphi(\tau_{тр.})$ – закон распределения времени перемещения вагонов между ремонтными позициями;

τ_a^H – нормативное время пребывания в ремонте вагонов a -й группы.

Естественно, что в начальный момент времени все промежуточные и вспомогательные величины должны быть обнулены: $i = 0; j = 0; n = 0; k = 0; v = 0; a = 0; P_{a-1}^* = 0; t_j^H = 0; t_{j-1}^O = 0; t_j^O = 0; t_{(j-1)M}^K = 0; t_{j-1}^K = 0; t_{n(j+1)}^O = 0; i_a = 0$ ($a = 1, 2, \dots, z$).

Оператор A_2 определяет общую годовую программу предприятия с учётом ремонта всех групп вагонов:

$$N_B = \sum_{a=1}^z N_a.$$

Оператор A_3 осуществляет переход к следующей группе вагонов:

$$a = a + 1.$$

Оператор A_4 определяет вероятность поступления в ремонт вагонов a -й группы

$$P_a = N_a / N_B.$$

Оператор A_5 рассчитывает верхнюю границу интервала, соответствующего вероятности поступления вагонов из a -й группы:

$$P_a^* = P_{a-1}^* + P_a.$$

Оператор P_6 проверяет, все ли группы вагонов были смоделированы, или нет:

$$a < z.$$

Оператор K_7 осуществляет подсчёт числа вагонов, поступивших в ремонт:

$$i = i + 1.$$

Оператор Φ_8 генерирует случайное число ξ_i , равномерно распределённое в интервале от 0 до 1,0 ($0 \leq \xi_i \leq 1,0$).

Оператор H_9 обнуляет счётчик числа групп вагонов, $a = 0$.

Оператор A_{10} переходит к следующей группе вагонов:

$$a = a + 1.$$

Оператор P_{11} сравнивает значение случайной величины ξ_i со значением верхней границы интервала, соответствующего вероятности поступления в ремонт вагона из a -й группы

$$\xi_i \leq P_a^*.$$

Если это условие не выполняется, то управление передаётся оператору A_{10} , в противном случае оператор F_{12} фиксирует номер группы, из которой поступил вагон, a .

Оператор K_{13} осуществляет подсчёт числа вагонов поступивших в ремонт из a -й группы:

$$i_a = i_a + 1.$$

Оператор F_{14} нумерует вагоны, поступившие в ремонт (заносит их в реестр).

Оператор H_{15} обнуляет значение числа позиций, $j = 0$.

Оператор A_{16} осуществляет переход к моделированию следующей ремонтной позиции:

$$j = j + 1.$$

Оператор Φ_{17} формирует случайное время перемещения вагона между ремонтными позициями $\tau_{тр.}$.

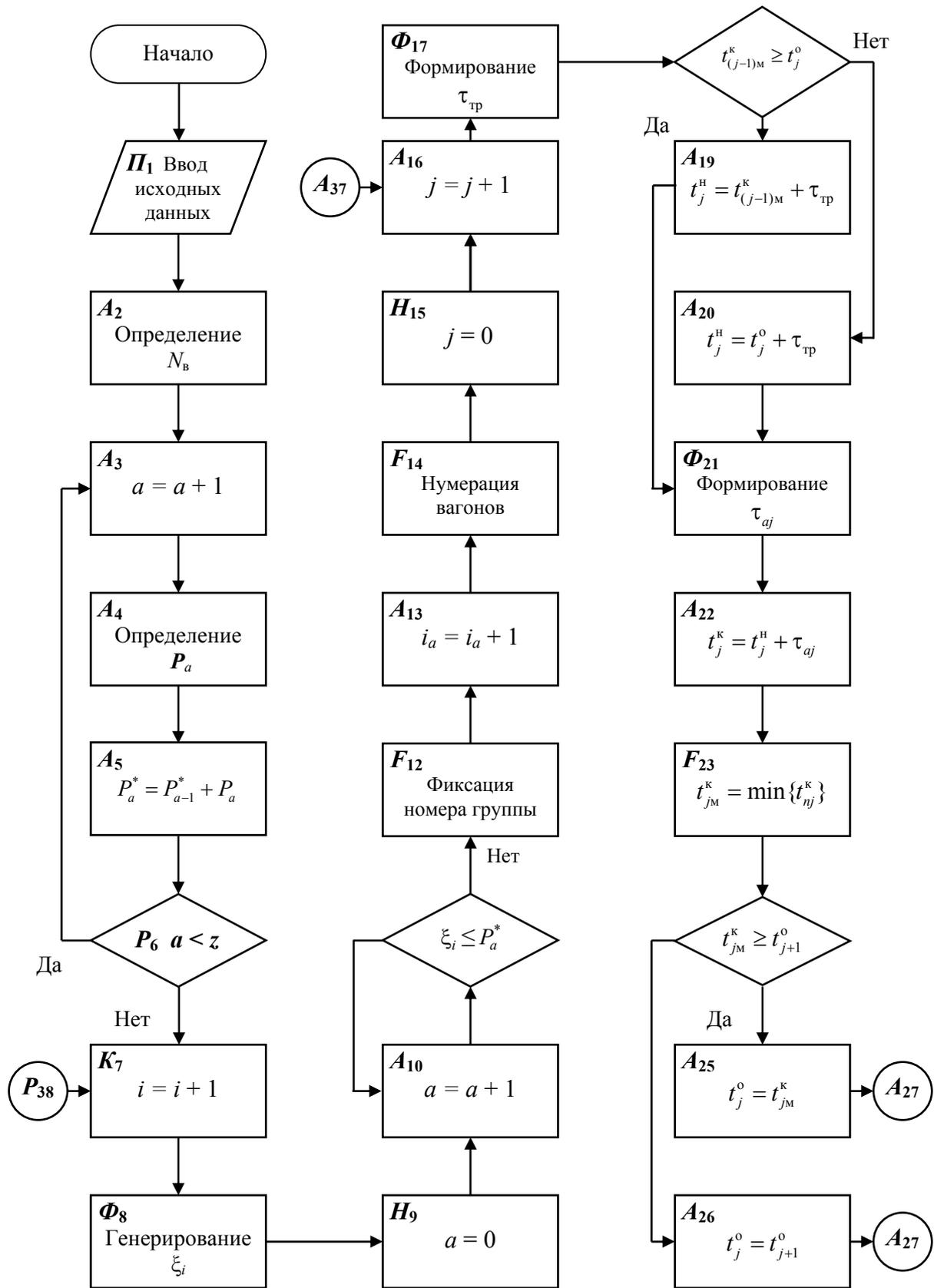


Рис. 1 (начало). Укрупнённая блок-схема алгоритма имитационного моделирования работы гибкого потока для ремонта вагонов как мультифазной поликанальной многопредметной системы массового обслуживания

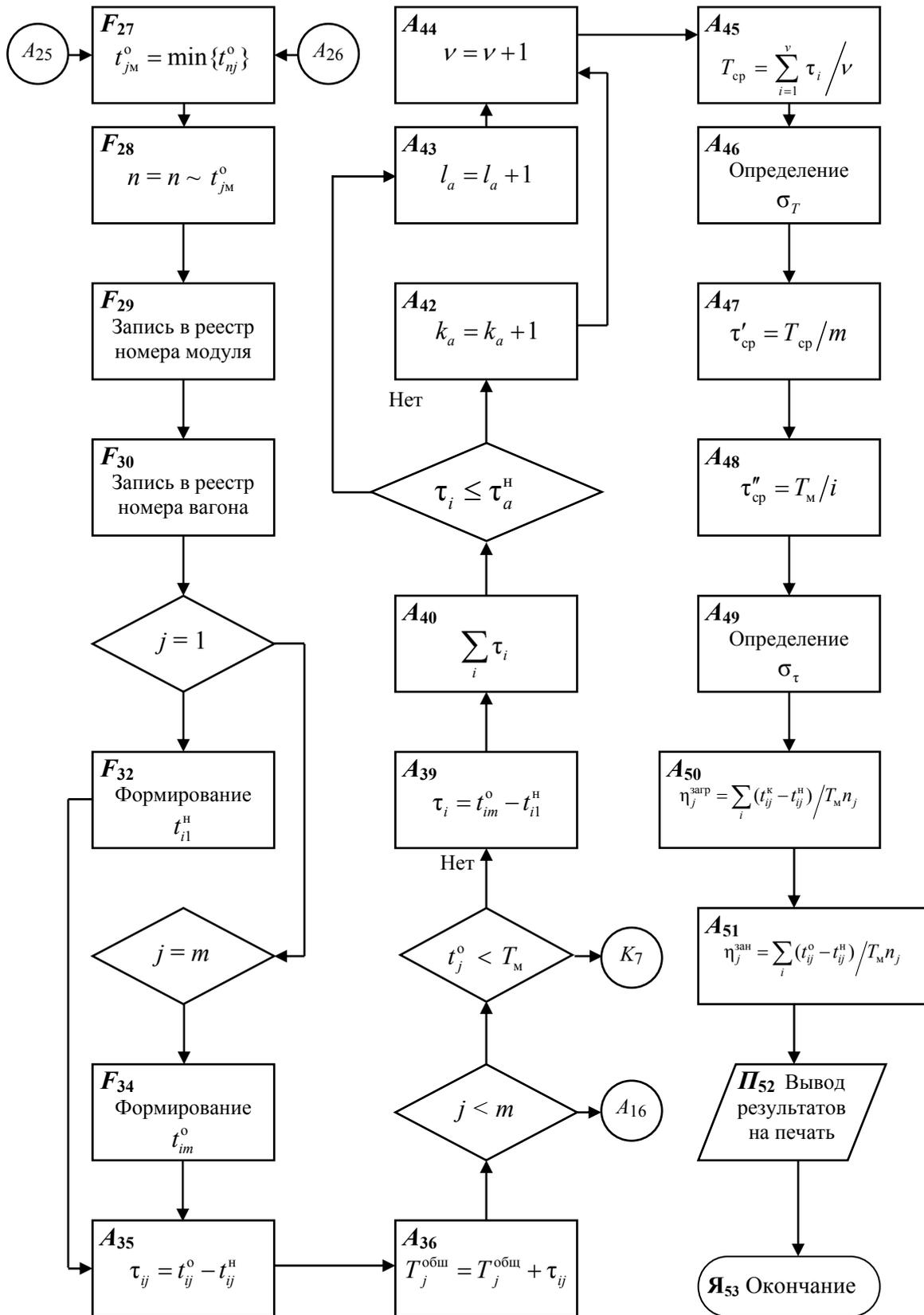


Рис. 1 (окончание)

Оператор P_{18} сравнивает минимальный момент окончания ремонта вагона на $(j - 1)$ -й позиции с моментом освобождения j -ой позиции:

$$t_{(j-1)M}^k \geq t_j^o,$$

если это условие выполняется, то оператор A_{19} вычисляет время начала ремонта вагона на j -ой позиции следующим образом:

$$t_j^h = t_{(j-1)M}^k + \tau_{тр},$$

в противном случае оператор A_{20} осуществляет следующее действие:

$$t_j^h = t_j^o + \tau_{тр}.$$

Оператор Φ_{21} формирует величину времени выполнения ремонтных работ на j -ой позиции согласно группе принадлежности вагона τ_{aj} .

Оператор A_{22} определяет момент времени окончания ремонта этого вагона на j -ой позиции:

$$t_j^k = t_j^h + \tau_{aj}.$$

Оператор F_{23} производит расчёт очередного минимального времени окончания ремонта одного из вагонов на j -ой позиции:

$$t_{jM}^k = \min\{t_{nj}^k\}, n = 1, 2, \dots, n_j.$$

Оператор P_{24} сравнивает минимальный момент окончания ремонта вагона на j -ой позиции с очередным моментом освобождения одного из модулей $(j + 1)$ -ой позиции:

$$t_{jM}^k \geq t_{j+1}^o,$$

если это условие выполняется, то оператор A_{25} вычисляет время освобождения j -ой позиции от вагона следующим образом:

$$t_j^o = t_{jM}^k,$$

в противном случае оператор A_{26} производит следующее действие

$$t_j^o = t_{j+1}^o.$$

Оператор F_{27} производит расчёт минимального момента освобождения модуля на j -ой позиции:

$$t_{jM}^o = \min\{t_{nj}^o\}, n = 1, 2, \dots, n_j.$$

Оператор F_{28} определяет номер модуля j -ой позиции с минимальным временем освобождения:

$$n = n \sim t_{jM}^o.$$

Оператор F_{29} вносит в реестр номер освобожденного модуля.

Оператор F_{30} вносит в реестр номер вагона, который находился в этом модуле.

Оператор P_{31} проверяет условие $j = 1$; если условие выполняется, то оператор F_{32} формирует базу данных, в которой для каждого i -го вагона хранится момент поступления его в ремонт t_{i1}^h .

Оператор P_{33} проверяет условие $j = m$; если условие выполняется, то оператор F_{34} формирует базу данных, в которой для каждого i -го вагона хранится момент выпуска его из ремонта t_{im}^o .

Оператор A_{35} определяет время пребывания i -го вагона на j -ой позиции:

$$\tau_{ij} = t_{ij}^o - t_{ij}^h.$$

Оператор A_{36} определяет общее время простоев i -го количества вагонов в ремонте на j -ой позиции:

$$T_j^{\text{общ}} = T_j^{\text{общ}} + \tau_{ij}.$$

Оператор P_{37} проверяет, все ли позиции потока были смоделированы при данном цикле, или нет:

$$j < m,$$

если условие выполняется, то управление передается оператору A_{16} .

Оператор P_{38} проверяет, не исчерпан ли интервал времени моделирования:

$$t_j^o < T_M,$$

если интервал не исчерпан, то управление передается оператору K_7 .

Оператор A_{39} определяет общее время пребывания i -го вагона в ремонте:

$$\tau_i = t_{im}^o - t_{i1}^h.$$

Оператор A_{40} суммирует эти значения $\sum_i \tau_i$.

Оператор P_{41} проверяет, не было ли превышено нормативное время пребывания вагона a -й группы в ремонте:

$$\tau_i \leq \tau_a^H,$$

в случае превышения нормативного времени простоя управление передаётся оператору K_{42} , который осуществляет подсчёт таких вагонов, в противном случае – к оператору K_{43} .

Оператор K_{42} подсчитывает число вагонов a -й группы, нарушивших регламент:

$$k_a = k_a + 1.$$

Оператор K_{43} производит подсчёт количества вагонов a -й группы, не превысивших норматив простоя в ремонте:

$$l_a = l_a + 1.$$

Оператор K_{44} производит подсчёт количества вагонов, вышедших из ремонта:

$$v = v + 1.$$

Оператор A_{45} определяет среднее время пребывания вагонов в ремонте

$$T_{cp} = \sum_{i=1}^v \tau_i / v.$$

Оператор A_{46} определяет среднеквадратическое отклонение времени пребывания вагонов в ремонте σ_T .

Оператор A_{47} определяет величину среднего такта потока:

$$\tau'_{cp} = T_{cp} / m.$$

Оператор A_{48} также определяет величину среднего такта потока:

$$\tau''_{cp} = T_m / i.$$

Оператор A_{49} определяет среднеквадратическое отклонение такта потока σ_τ .

Оператор A_{50} определяет коэффициент загрузки каждой ремонтной позиции:

$$\eta_j^{зарп} = \sum_i (t_{ij}^k - t_{ij}^H) / T_m n_j.$$

Оператор A_{51} определяет коэффициент занятости каждой ремонтной позиции

$$\eta_j^{зан} = \sum_i (t_{ij}^o - t_{ij}^H) / T_m n_j.$$

Оператор P_{52} осуществляет вывод необходимой информации на печать.

Оператор $Я_{53}$ завершает процесс моделирования.

Таким образом, разработан новый инструментарий, который ещё на стадии проектирования позволяет исследовать и оценить работу нового или модернизируемого вагоноремонтного предприятия.

Исследования разных структурных вариантов гибких потоков свидетельствуют о том, что их пропускная способность увеличивается до 40 % по сравнению с традиционными поточными линиями, и, кроме того, значительно сокращается продолжительность пребывания вагонов в ремонте и, следовательно, уменьшение расходов на ремонт, а также повышается качество ремонта, и в конечном итоге, повышается безопасность движения и эффективность эксплуатации подвижного состава. Полученные результаты говорят о высокой эффективности гибких вагоноремонтных потоков.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гридюшко, В. И. Вагонное хозяйство [Текст] / В. И. Гридюшко, В. П. Бугаев, Н. З. Криворучко. – М.: Транспорт, 1988. – 295 с.
2. Ножевников, А. М. Поточно-конвейерные линии ремонта вагонов [Текст] / А. М. Ножевников. – М.: Транспорт, 1980. – 137 с.
3. Скиба, И. Ф. Комплексно-механизированные поточные линии в вагоноремонтном производстве [Текст] / И. Ф. Скиба, В. А. Ёжиков. – М.: Транспорт, 1982. – 136 с.
4. Вагонное хозяйство [Текст] / под ред. П. А. Устича. – М.: Маршрут, 2003. – 560 с.
5. Дударев, А. Е. Имитационное моделирование работы поточных линий для ремонта вагонов как многофазных систем массового обслуживания [Текст] / А. Е. Дударев, В. В. Мямлин; Днепропетр. ин-т инж. ж.-д. трансп. – Д., 1985. – 16 с. – Деп. в ЦНИИТЭИ МПС 30.12.85, № 3406.
6. 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; Днепропетр. ин-т инж. ж.-д. трансп. – Д., 1986. – 12 с. – Деп. в ЦНИИТЭИ МПС 30.05.86, № 3582.
7. Мямлин, В. В. Использование метода статистического моделирования при проектировании поточных линий для ремонта вагонов [Текст] / В. В. Мямлин // Вопросы оптимизации деталей тележек и организации обслуживания вагонов. – Д.: ДИИТ, 1985. – С. 70-76.
8. 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 заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2008. – Вип. 24. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2008. – С. 44-48.
9. Мямлин, В. В. Схема кусочно-линейного агрегата как математическая модель функционирования технологических модулей асинхронного гибкого потока ремонта вагонов [Текст] / В. В. Мямлин // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2008. – Вип. 25. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2008. – С. 18-22.
10. Мямлин, В. В. Компонентные решения организационно-технологических структур перспективных вагоноремонтных депо с асинхронными гибкими потоками ремонта вагонов [Текст] / В. В. Мямлин // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2010. – Вип. 31. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2010. – С. 55-62.
11. Лифшиц, А. Л. Статистическое моделирование систем массового обслуживания [Текст] / А. Л. Лифшиц, Э. А. Мальц. – М.: Советское радио, 1978. – 248 с.
12. Бусленко, Н. П. Моделирование сложных систем [Текст] / Н. П. Бусленко. – М.: Наука, 1978. – 400 с.

Поступила в редколлегию 14.04.2011.

Принята к печати 19.04.2011.