УДК 656.073

Десятский С.П., Сизова Е.И.

ИССЛЕДОВАНИЕ И ВЫБОР МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЛИНИИ ПО ПРИЁМУ МАССОВОГО СЫРЬЯ В УСЛОВИЯХ ДИНАМИКИ ВХОДЯЩЕГО ПОЕЗДОПОТОКА

Постановка проблемы. Приём металлосодержащего сырья на аглофабрики металлургических комбинатов осуществляется транспортно-грузовыми комплексами (ТГК). Они включают выгрузочную систему, состоящую из роторных вагоноопрокидывателей с отводящими конвейерами, и многофункциональную грузовую станцию.

Центральным звеном такого ТГК является технологическая линия по приёму и выгрузке маршрутов с сырьём, включающая транспортный и грузовой модули. При этом поточность процесса переработки маршрутов и эффективная работа технологической линии грузовой станции и ТГК в целом достигается только при условии обеспечения синхронизации работы модулей.

Ведущим в технологической линии является грузовой модуль, представляющий собой детерминированную систему, перерабатывающая способность которой устанавливается в соответствии с производственной мощностью аглофабрики.

Транспортный модуль производит приём гружёных маршрутов на технологическую линию, коммерческий и технический приём и подачу вагонов маршрута (тремя группами) на выгрузку.

Исходя из комплекса операций, выполняемых технологической линией и принятой перерабатывающей мощности грузового модуля, формируется проектная (регламентируемая) технологическая траектория процесса переработки маршрута и устанавливается нормативная продолжительность её цикла ($T_Ц$), обеспечивающая синхронизацию работы модулей.

Однако, в существующих эксплуатационных условиях подход маршрутов с сырьём на грузовую станцию характеризуется значительной неравномерностью с колебанием интервалов прибытия от 0,5-1 до 6-8 часов и более. То есть, транспортный модуль характеризуется стохастическим режимом функционирования, при котором в периоды сгущения интервалов прибытия возникает необходимость дополнительного простоя маршрутов и групп вагонов в ожидании выгрузки. В эти периоды продолжительность цикла переработки маршрута ($T_Ц$) может превышать нормативный в 1,5-2,5 раза.

При такой аритмии потоков внешнего транспорта и потребности в сырье агломерационного производства технологическая линия ТГК работает крайне неэффективно. Так, лишь 18-20 % общего числа маршрутов перерабатываются в рамках проектной технологической траектории. Это приводит к существенному увеличению продолжительности использования вагонов внешнего парка, значительным транспортным издержкам и производственным потерям [1].

По результатам проведённых исследований было установлено, что технологическая линия в процессе функционирования, в зависимости от соотношения интервалов прибытия маршрутов в транспортный модуль ($I_{ВХ}$) и продолжительности их выгрузки в грузовом модуле ($I_{ВЫХ}$), проходит несколько различных состояний. При этом продолжительность цикла переработки маршрутов ($T_Ц$) может изменяться от нормативного до максимального значения, имеющих место при небольшом сгущении интервалов прибытия [2].

Установлено также, что увеличение общей продолжительности ($T_Ц$) непосредственно связано с ростом продолжительности дополнительного простоя маршрутов в транспортном модуле в ожидании выгрузки. В связи с тем, что указанный простой выполняет в процессе переработки маршрутов важную регулирующую функцию, он выделяется в структуре цикла в самостоятельную операцию – технологический отстой маршрутов ($t_{ТО}$).

При оперативном управлении переработкой маршрутов переход от контроля за ходом процесса (при проектной технологии) к управлению процессом (при её нарушении) необходим при превышении фактического значения продолжительности технологического отстоя ($t_{ТОФ}$) по сравнению с нормативной величиной, т.е. $t_{ТОФ} > t_{ТОН}$. Следовательно, установление зависимости между фактической продолжительностью технологического отстоя маршрутов и интервалами их прибытия $t_{ТОФ} = f(I_{ВХ})$ позволит определять её величину и соответствующую ей фактическую общую продолжительность цикла переработки маршрута ($T_{ЦФ}$) для каждого состояния технологической линии.

На этой основе разработан метод логистического управления процессом приёма и выгрузки маршрутов при имеющей место динамике входящего поездопотока, который обеспечит эффективное взаимодействие (синхронизацию работы) различного по характеру функционирования грузового и транспортного модулей.

Реализация метода управления связана с необходимостью выбора математической модели для установления рассматриваемой зависимости $t_{ТОФ} = f(I_{ВХ})$.

Анализ последних публикаций и исследований. Вопросам моделирования станционных процессов на магистральных железных дорогах всегда уделялось повышенное внимание. В особой мере это относится к простоям вагонов. Для этой цели использовались аналитические зависимости, включая математический аппарат теории массового обслуживания (ТМО). Ряд методик расчёта показателей работы станций на основе ТМО приведён в работе [3].

В связи с возросшей динамикой поездопотоков и усложнением эксплуатационных условий в последний период для исследования показателей работы магистральных железнодорожных станций и взаимодействия их элементов всё большее распространение получает метод имитационного моделирования. Принципы и методика исследования станционных процессов с его применением изложены в работах [3, 4].

Для моделирования работы промышленных железнодорожных станций общие положения применения математического аппарата ТМО известны и представлены в [5, 6]. Однако, практическое моделирование станционных и грузовых процессов получает здесь своё развитие только в последние годы.

Следовательно, для решения задачи управления процессом приёма и выгрузки маршрутов с учётом динамики его развития и обеспечения надёжной работы технологической линии необходимо оценить и выбрать математическую модель, которая подтвердит наличие связи $t^{T}_{ТОФ} = f(I_{ВХ})$, а также позволит определить значимость и тесноту связи.

Целью статьи является исследование и выбор модели управления функционированием технологической линии ТГК по приёму и выгрузке маршрутов в условиях динамики поездопотока.

Содержание и результаты исследований. Имеющаяся методическая база и опыт магистральных железных дорог дают основание считать, что для решения поставленной задачи управления технологической линией ТГК, в первую очередь, целесообразно исследовать возможность применения аналитических моделей.

Для моделирования процесса проведены комплексные хронометражные наблюдения, собраны и систематизированы технологические показатели работы технологической линии и станционных процессов за 30 суток. На этой основе подготовлен статистический массив данных по переработке 314 маршрутов, 950 групп и 17,3 тыс. вагонов.

На первом этапе для исследования рассматриваемой зависимости $t_{ТОФ} = f(I_{ВХ})$ принимается математический аппарат ТМО. В процессе исследований технологическая линия рассматривается как многоканальная система массового обслуживания с неограниченной очередью. Это адекватно реальной ситуации и обеспечивает корректность процесса моделирования [7, 8].

На вход в технологическую линию поступает поток заявок, а время обслуживания заявки есть случайная величина. Указанное означает, что наступление события (прибытие маршрута на технологическую линию) не зависит от времени, прошедшего с момента наступления последующего события.

При моделировании системы массового обслуживания методы анализа являются корректными только в том случае, когда все потоки событий, переводящие её из состояния в состояние, являются простейшими. Иначе говоря, необходимо, чтобы время между последовательным прибытием маршрутов и время их обслуживания, будучи случайными, количественно описывалось экспоненциальным распределением.

Однако, при анализе данных функционирования системы установлено, что потоки событий процесса приёма маршрутов на технологическую линию не являются простейшими (пуассоновскими), поскольку не соблюдается условие простейшего потока об экспоненциальном распределении длин промежутков времени между соседними событиями потока.

Проведённая проверка потоков событий по критерию Пирсона показала, что значение критерия $\chi^2 = 55{,}4$, а уровень значимости (понимаемый, как вероятность ошибки первого рода) не превышает $\rho = 4 \cdot 10^{-9}$. Следовательно, принятая статистическая гипотеза об экспоненциальном распределении отвергается.

Таким образом, на основании вышеизложенного, имеются все основания считать, что применение метода моделирования работы технологической линии по приёму и выгрузке маршрутов на основе математического аппарата ТМО является некорректным.

Дальнейший углублённый анализ статистических данных по функционированию технологической линии позволил установить, что случайные процессы, протекающие в ней, представляют собой случайные переходы системы из состояния в состояние. Иначе говоря, рассматриваемый вопрос представляет стохастическую задачу, где процесс принятия решения можно представить конечным числом состояний, а переходные вероятности между состояниями описать Марковской цепью в соответствии с теорией случайных процессов [8, 9].

В связи с вышеизложенным, на втором этапе в качестве основного метода исследований приняты инженерные приложения теории цепей Маркова с конечным числом состояний и непрерывным временем. При этом известно, что переходы из состояния в состояние происходят под воздействием пуассоновских потоков событий и характеризуются следующими признаками: ординарностью, отсутствием последействия и стационарностью. Если поток событий обладает всеми этими свойствами, он называется стационарным пуассоновским или простейшим потоком.

Тогда вероятность перехода системы из состояния S_i, в котором она находилась в момент t, в состояние S_j за элементарный промежуток времени Δt, непосредственно примыкающий к t, приближенно равна $\lambda_{ij}\Delta t$, где $\lambda_{ij}(t)$ – интенсивность пуассоновского потока событий, переводящего систему S_i в S_j.

В случае, когда известны все интенсивности потоков, для вероятностей $P_i(t)$ нахождения системы в состоянии S_i в момент времени t можно составить систему обыкновенных дифференциальных уравнений Колмогорова.

В связи с указанным, для аппроксимации реальных потоков событий пуассоновскими с аналогичными характеристиками предлагается следующий метод:

1) на основе эмпирических данных выделяются устойчивые состояния, определяемые динамикой изменения длин промежутков времени между событиями;
2) определяется относительное время нахождения в каждом из состояний;
3) определяется количество переходов из каждого состояния во все возможные состояния;
4) строится граф переходов между возможными состояниями и соответствующая ему система уравнений Колмогорова;
5) используя систему уравнений Колмогорова для предельных вероятностей, по найденным в п. 2 и 3 характеристикам определяются плотности пуассоновских потоков с такими же (или близкими к ним) характеристиками.

При этом ограничения на неизвестные плотности потоков должны примерно соответствовать эмпирическим значениям, а система неравенств для них должна определять непустое множество.

Вначале по статистическим данным проанализированы интервалы приёма маршрутов на технологическую линию с внешней сети (рис. 1).

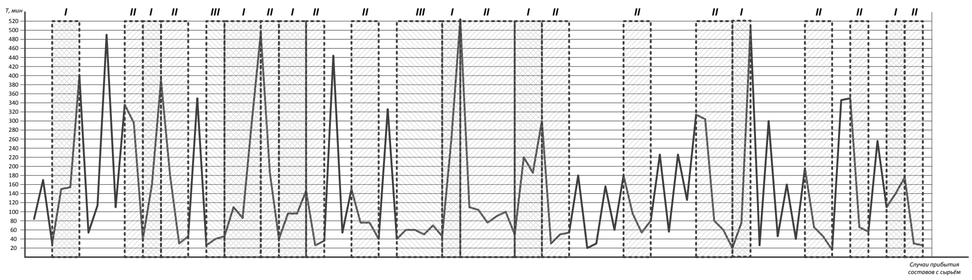

Рис. 1. График изменения интервалов прибытия маршрутов с внешней сети на технологическую линию

Для входящего потока маршрутов вводим 6 основных состояний: S_1 – штатный режим, S_2 – разрежение интервалов, S_3 – сгущение интервалов, S_4 – нештатный режим, S_5 – резкое сгущение интервалов, S_6 – резкое разрежение интервалов.

Граф состояний входящего потока приведён на рисунке 2.

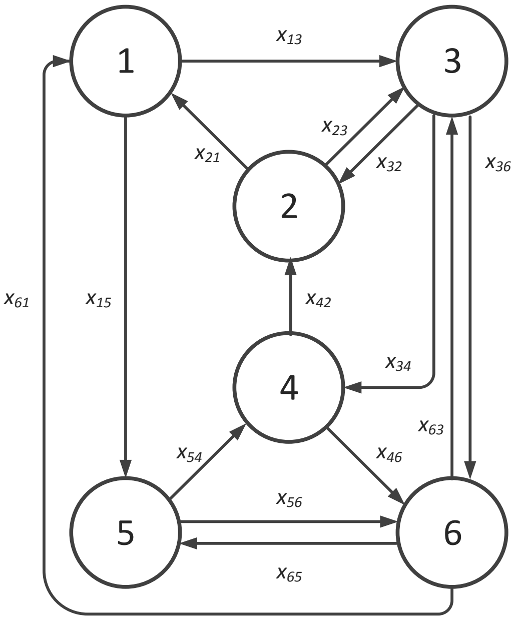

Рис. 3. Граф состояний входящего потока маршрутов на технологическую линию

Пусть P_i – относительное время для каждого из состояний. Тогда из эмпирических данных находим: $P_1 = 0,0700$; $P_2 = 0,1679$; $P_3 = 0,0928$; $P_4 = 0,3258$; $P_5 = 0,0521$; $P_6 = 0,2914$.

Фактическое количество переходов между состояниями за наблюдаемое время представлено в таблице 1.

Таблица 1

Фактическое количество переходов между состояниями

Последовательность перехода	**Количество случаев**
1-5	7
2-1	2
2-3	25
3-2	8
3-4	21
3-6	5
4-2	19
4-6	24
5-4	23
5-6	5
6-1	5
6-3	9
6-5	21

Добавим теоретически возможный, но не произошедший за время наблюдения переход 1-3 и построим диаграмму состояний для марковского процесса с непрерывным временем, который будет аппроксимировать наблюдаемый поток. Через x_{ik} обозначены неизвестные плотности простейших потоков, приводящих к переходам между состояниями.

По найденным характеристикам времени пребывания в каждом из интервалов и количеству переходов из состояния в состояние с использованием уравнений Колмогорова определяются плотности пуассоновских потоков с такими же (или близкими к ним) характеристиками.

Система уравнений для предельных вероятностей имеет вид:

$$\begin{cases} -\ \ x_{13}+x_{15}\ \ P_1+x_{21}P_2+x_{61}P_6=0 \\ -\ \ x_{21}+x_{23}\ \ P_2+x_{32}P_3+x_{42}P_4=0 \\ x_{13}P_1+x_{23}P_2-\ \ x_{32}+x_{34}+x_{36}\ \ P_3+x_{63}P_6=0 \\ x_{34}P_3-\ \ x_{42}+x_{46}\ \ P_4+x_{54}P_5=0 \\ x_{15}P_1-\ \ x_{54}+x_{56}\ \ P_5+x_{65}P_6=0 \\ x_{36}P_3+x_{46}P_4+x_{56}P_5-\ \ x_{61}+x_{63}+x_{65}\ \ P_6=0 \\ P_1+P_2+P_3+P_4+P_5+P_6=1 \end{cases} \qquad (1)$$

Подставим эмпирические значения P_i и рассмотрим систему относительно x_{ik}. При этом последнее уравнение будет выполняться автоматически, а каждое из первых шести уравнений является следствием всех остальных, поэтому одно любое уравнение можно исключить:

$$\begin{cases} -\ \ x_{13}+x_{15}\ \ P_1+x_{21}P_2+x_{61}P_6=0 \\ -\ \ x_{21}+x_{23}\ \ P_2+x_{32}P_3+x_{42}P_4=0 \\ x_{13}P_1+x_{23}P_2-\ \ x_{32}+x_{34}+x_{36}\ \ P_3+x_{63}P_6=0 \\ x_{34}P_3-\ \ x_{42}+x_{46}\ \ P_4+x_{54}P_5=0 \\ x_{15}P_1-\ \ x_{54}+x_{56}\ \ P_5+x_{65}P_6=0 \end{cases} \qquad (2)$$

Система имеет бесконечное множество решений, поэтому (а также для получения решения с ненулевыми x_{ik}) введём дополнительные ограничения:

$$\begin{cases} 0 \le x_{13} \le A \\ A_{min} \le x_{15} \le A_{max} \\ A_{min} \le x_{21} \le A_{max} \\ A_{min} \le x_{23} \le A_{max} \\ A_{min} \le x_{32} \le A_{max} \\ A_{min} \le x_{34} \le A_{max} \\ A_{min} \le x_{36} \le A_{max} \\ A_{min} \le x_{42} \le A_{max} \\ A_{min} \le x_{46} \le A_{max} \\ A_{min} \le x_{54} \le A_{max} \\ A_{min} \le x_{56} \le A_{max} \\ A_{min} \le x_{61} \le A_{max} \\ A_{min} \le x_{63} \le A_{max} \\ A_{min} \le x_{65} \le A_{max} \\ \sum x_{ij} \le N \end{cases} \tag{3}$$

Здесь N – наблюдаемое число переходов между состояниями, а граничные уровни $A_{\min} = 3$, $A = 10$ и $A_{\max} = 35$ выбраны именно такими для обеспечения сравнимости между эмпирическими и теоретическими значениями x_{ik} и для совместности системы условий (2)+(3).

Система ограничений (2)+(3) имеет бесконечно много решений. Практически для нахождения какого-либо из них может быть рассмотрено решение задачи линейного программирования

$$F\ \bar{x}\ \to extr\Big|_{\bar{x}\in S}, \tag{4}$$

где $\bar{x}$ - вектор всех изменяемых значений x_{ik}, S - множество всех решений системы (2)+(3), а F - некоторая линейная функция. Приведем примеры полученных решений для разных функций F (табл. 2).

Учитывая большую свободу при выборе $\bar{x}$ из условий (2)+(3), можно упростить конструируемую цепь Маркова, исключив из нее переходы с малыми наблюдаемыми частотами. При этом часть переходов оставляется для обеспечения условия существования предельных вероятностей: из любого состояния системы в любое другое можно перейти, двигаясь по стрелкам.

Таким образом, в результате проведённых исследований установлено, что связь между величиной интервалов между событиями входящего потока (маршрутами) и продолжительностью цикла переработки маршрута на технологической линии существует, значима, но является достаточно слабой. Так, она характеризуется коэффициентом корреляции $r = -0,477$, что соответствует коэффициенту детерминации линейной однофакторной модели $R^2 = 0,23$. Это свидетельствует о том, что линейная однофакторная модель описывает только 23 % случаев изменения продолжительности цикла переработки маршрута в зависимости от значения величины интервалов между входящими маршрутами.

Таблица 2

Примеры решений для разных функций F

Последовательность перехода	$x_{23} \to \max$	$\sum x_{ij} \to \min$	$\sum x_{ij} \to \max$
1-3	10,00	10,00	10,00
1-5	9,68	9,68	21,00
2-1	3,00	3,00	3,00
2-3	30,68	4,48	18,42
3-2	35,00	3,00	12,29
3-4	21,42	6,02	35,00
3-6	16,04	16,04	3,00
4-2	7,39	3,00	7,54
4-6	3,00	3,00	8,03
5-4	26,79	26,79	35,00
5-6	3,00	3,00	10,00
6-1	3,00	3,00	5,72
6-3	3,00	10,00	3,00
6-5	3,00	9,68	3,00

В соответствии с вышеизложенным, достаточно очевидно, что использование математического аппарата теории цепей Маркова также не даёт полного описания процесса, и, следовательно, надёжного основания для установления критерия управления работой технологической линии ТГК.

Проведённые исследования и их результаты дают основания считать, что решение поставленной задачи связано с необходимостью применения имитационной модели процесса приёма и выгрузки маршрутов. При этом наиболее продуктивным считается применение комбинированного метода расчёта, позволяющего на имитационной модели получать показатели технологических процессов, а с помощью аналитических зависимостей устанавливать их взаимосвязи.

В этом направлении и проводятся дальнейшие исследования.

ВЫВОДЫ

1. В основу логистического метода управления процессом приёма и выгрузки маршрута, при имеющей место динамике входящего поездопотока, принята зависимость между продолжительностью технологического отстоя перед выгрузкой и интервалами их прибытия $t_{ТОФ} = f(I_{ВХ})$. Наличие такой зависимости позволит определять величину продолжительности технологического отстоя и соответствующую ей общую продолжительность цикла переработки маршрута для любого состояния технологической линии.

2. Основываясь на опыте магистральных железных дорог, для исследования закономерностей потокового процесса технологической линии по приёму и выгрузке маршрутов были использованы аналитические методы.

На первом этапе исследование процесса проведено с использованием математического аппарата ТМО. По результатам исследования принятая статистическая гипотеза об экспоненциальном распределении входящего поездопотока не подтвердилась. Стало очевидным, что для решения поставленной задачи принятая математическая модель является несостоятельной.

Углублённый анализ статистических данных позволил определить, что вероятностные процессы, протекающие в технологической линии, представляют собой случайные переходы системы из состояния в состояние. Следовательно, рассматриваемый вопрос представляет стохастическую задачу, где процесс принятия решения можно представить конечным числом состояний, а переходные процессы между состояниями описать Марковской цепью.

На втором этапе для решения задачи приняты инженерные приложения теории цепей Маркова с конечным числом состояний. На основе полученных результатов установлено, что связь $t_{ТОФ} = f(I_{ВХ})$ существует, значима, но является достаточно слабой, поскольку характеризуется коэффициентом корреляции $r = -0,477$, то есть, описывает только 23 % случаев. Для принятия управленческих решений в процессе переработки поездопотока указанное является недостаточным.

3. Проведённые исследования дают основание считать, что для решения поставленной задачи необходимо применение имитационного моделирования работы технологической линии переработки маршрутов с последующим определением заданной зависимости аналитическим методом.

Перечень ссылок

1. *Парунакян В.Э.* Моделирование процесса переработки вагонопотока грузовой станции с учётом воздействия динамических факторов / В.Э. Парунакян, В.А. Бойко // Вісник СНУ ім. В. Даля. – 2011. – № 12 (166), Ч. 1. – С. 174-185.
2. *Сизова Е.И.* Исследование закономерностей процесса и разработка метода управления функционированием технологической линии по приёму массового сырья в условиях динамики входящего поездопотока / Е.И. Сизова // Вісник ПДТУ. – 2014. – № 12 (166), Ч. 1. – С. 174-185.
3. Управление эксплуатационной работой и качеством перевозок на железнодорожном транспорте / П.С. Грунтов, Ю.В. Дьячков, А.М. Макарочкин и др.: Под ред. П.С. Грунтова. – М.: Транспорт, 1994 г. – 543 с.
4. *Бородин А.Ф.* Эффективно использовать станционные мощности / А.Ф. Бородин // Железнодорожный транспорт. – 2006. - № 9. – С. 41-49.
5. *Дегтяренко В.Н.* Транспортные узлы промышленных районов. Учебник для вузов. – М.: Стройиздат, 1974 г. – 303 с.
6. *Смехов А.А.* Математические модели транспортно-грузовых процессов / А.А. Смехов // Промышленный транспорт. – 1986. - № 1. – С. 67.
7. *Таха Хемди А.* Введение в исследование операций, 7-е издание.: Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2005 г. – 912 с.
8. *Косоруков О.А.* Исследование операций: Учебник / О.А. Косоруков, А.В, Мищенко // Под общ. ред. д.э.н., проф. Н.П. Тихомирова. – М.: Издательство «Экзамен», 2003. – 448 с.
9. *Вентцель Е.С.* Теория случайных процессов и её инженерные приложения. – Учебное пособие для вузов / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. – 4-е изд., стер. – М.: Высш. Шк., 2007. – 479 с.

Статья поступила 8.12.2014 г.

Рецензент: д.т.н., проф. В.Э. Парунакян