



Принципы моделирования процессов вагоноремонта



Михаил БОЛОТИН
Mikhail M. BOLOTIN

Владимир ГЛАЗКОВ
Vladimir N. GLAZKOV



Валерий ВОРОТНИКОВ
Valery G. VOROTNIKOV

Болотин Михаил Михайлович — доктор технических наук, профессор Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ), Москва, Россия.

Глазков Владимир Николаевич — кандидат технических наук, доцент, проректор по международным связям МИИТ, Москва, Россия.

Воротников Валерий Геннадьевич — кандидат технических наук, доцент МИИТ, Москва, Россия.

Авторы теоретически обосновывают подходы к оценке устойчивости и надежности процессов ремонта железнодорожных вагонов, принципы организации производства в ремонтном депо, а также создания математических и технологических процессных моделей. Показаны способы решения оптимизационных задач на основе метода линейного программирования, включая расчеты планов производства продукции, использования оборудования, распределения планового ремонта и поставки запасных частей.

Ключевые слова: теория управления, железная дорога, автоматизация, ремонт вагонов, математическое моделирование, линейное программирование, устойчивость производственных процессов, технологическая надежность, критерии оценки, оптимизация.

Применительно к заявленной теме существует определенный набор понятий, который нуждается в целевой интерпретации. При очевидной взаимозависимости они имеют свою логику связей и играют значимую роль в создании моделей линейного программирования и решении транспортных задач.

ПРОЦЕССЫ И ИХ ПРОЕКЦИИ

Производственный процесс — это совокупность действий работников и орудий труда, в результате которых за определенное время предметы труда превращаются в готовую продукцию или услугу в заданном количестве, качестве и ассортименте.

Технологический процесс — часть производственного, упорядоченная последовательность взаимосвязанных целенаправленных действий по изменению предмета труда.

Организация производства — комплекс мероприятий, реализующих принципы организации производственного процесса и направленных на повышение эффективности труда с учетом характера и уровня используемых при этом техники и технологии.

Принципы организации производственного процесса (специализации, автоматиза-

ции, пропорциональности, сопряженности пропускных способностей, дифференциации, прямооточности, ритмичности и др.) — *исходные положения, на основе которых осуществляется построение, функционирование и развитие процедур создания продукции или услуг.*

Специализация предприятий определяется объемом производства одноименных изделий и является важнейшим фактором роста производительности труда. Уровень специализации вагоноремонтных депо и заводов характеризуется количеством типов ремонтируемых вагонов. Исследованиями установлено, что специализация депо способствует росту его производственной мощности примерно на 3,5%.

Автоматизация производства опирается на принцип достижения конечного результата (рост производительности труда при замене механизированных машин автоматическими), принцип комплексности (автоматизация производства должна охватывать все структуры предприятия) и принцип экономической необходимости (автоматизация осуществляется там, где она экономически оправдана). Повышение уровня автоматизации на 3% в условиях вагоносборочного участка при стационарном методе ремонта приводит к увеличению производственной мощности примерно на 2,3%, а при увеличении уровня автоматизации на 2% и комбинированном (стационарно-поточном) методе рост мощности может достичь 8%.

Пропорциональность производственного процесса — такое его состояние, при котором все участки работают с одинаковой производительностью (пропускной способностью), обеспечивающей выполнение заданного объема выпуска вагонов из ремонта.

Пропускная способность участка производства — фактическое количество объектов (вагонов, узлов, деталей), которое может быть отремонтировано за единицу времени в рамках действующей технологии. Пропускная способность должна определяться по производительности ограничивающих видов оборудования или рабочих мест.

Принцип сопряженности пропускных способностей применительно к вагоноремонтному депо (заводу) означает, что про-

пускные способности всех участков производства предполагают быть пропорциональными пропускной способности вагоносборочного участка (цеха). В общем виде критерий сопряженности пропускных способностей участков производства можно представить так:

$$\Delta \Pi = nQ - \frac{\delta \alpha M}{F},$$

где $\Delta \Pi$ — резерв (дефицит) пропускной способности участка производства;

n — количество лимитирующих станков (рабочих мест) на участке;

Q — средняя производительность лимитирующего станка (рабочего места);

δ — коэффициент приведения пропускной способности вагоносборочного участка (цеха) к пропускной способности отдельно взятого участка производства;

α — доля узлов (деталей), требующих ремонта на лимитирующем оборудовании;

M — производственная мощность вагоносборочного участка (цеха);

F — номинальный годовой фонд времени работы вагоносборочного участка (цеха).

Принцип дифференциации характеризует структуру предприятия — возможность рассредоточения (дифференциации) производственного процесса по нескольким специализированным подразделениям.

Прямоточность отражает степень рациональности движения предметов труда в производстве — отсутствие возвратных движений предметов труда и длительность транспортных маршрутов.

Ритмичность производства заключается в обеспечении выпуска вагонов (узлов) в равные промежутки времени с целью выполнения заданного плана.

КАЧЕСТВО КАК ЭКВИВАЛЕНТ УСТОЙЧИВОСТИ

Целью функционирования вагонного депо (вагоноремонтного завода) в рыночных условиях является своевременный выпуск качественной продукции установленного объема и номенклатуры при максимально возможной экономической эффективности (максимум прибыли, минимум себестоимости или приведенных суммарных затрат).



Под качественной продукцией вагоноремонтного депо (вагоноремонтного завода) понимается вагон, прошедший плановый вид ремонта с соблюдением всех установленных правил и технологических норм, допущенный к эксплуатации (перевозке грузов или пассажиров) и не имеющий существенных повреждений в течение гарантийного срока [1].

Организация работы современного вагоноремонтного комплекса требует учета внешних и внутренних возмущений. Исследованиями установлено, что из всех внешних возмущений, действующих на вагонное депо (завод), определяющими являются неравномерная трудоемкость ремонтных операций (из-за неодинакового уровня износа, повреждений и надежности элементов вагонов, разнотипности вагонов) и риск заказа на ремонт вагона. Колебания этих параметров наиболее серьезно сказываются на устойчивости вагоносборочных участков (цехов, поточных линий) и значениях важнейших показателей хозяйственной деятельности.

Устойчивость процесса — способность объекта сохранять текущее состояние (работоспособность) при наличии внешних возмущений и стабильно выпускать установленные виды продукции в заданных объемах и с определенным качеством. Применительно к производственной специфике будем различать технологическую устойчивость процесса (участка производства), устойчивость процесса как системы автоматического регулирования (САР) и устойчивость развития.

Под технологической устойчивостью вагоносборочных участков (цехов) подразумеваются их способность непрерывно выпускать вагоны из ремонта без срыва такта или графика работы в течение смены, сохраняя свою работоспособность в условиях изменяющейся трудоемкости и риска заказа [2].

Под риском заказа понимается мера опасности — вероятность срыва подачи вагонов в ремонт, возникновения убытков или недополучения доходов по сравнению с прогнозируемым вариантом в связи с неблагоприятными обстоятельствами.

Технологическая устойчивость участка (цеха) должна обеспечиваться созданием условий для применения поточного производства и — на его базе — автоматизированных процессов с использованием гиб-

ких автоматизированных машин, гибких связей между производственными участками, автоматизированных рабочих мест и персонала, способного к восприятию знаний и инновационных технологий.

Для получения критерия технологической устойчивости производственных процессов ремонта вагонов применимы метод построения доверительного интервала для математического ожидания случайной нормально распределенной величины при известном σ и способ выравнивания трудоемкости путем постановки на ремонтную позицию нескольких вагонов (объектов).

С этой целью запишем

$$\tilde{T} + \frac{z_p \sigma}{\sqrt{k_3 p_\theta}} \leq \beta \tilde{T},$$

где $\tilde{T}$ — средняя приведенная трудоемкость ремонта вагона для данного вагоноремонтного предприятия, чел. — ч;

z_p — нормированное отклонение (при доверительной вероятности $p=0,999$, $z_p=3,3$);

$$\sigma \approx \frac{T_{\max} - T_{\min}}{6} \text{ — среднеквадратическое}$$

отклонение;

$T_{\max}, T_{\min}$ — максимально и минимально возможные трудоемкости ремонта вагона в данном депо, чел.-ч;

k_3 — число вагонов, одновременно ремонтируемых на позиции;

p_θ — риск заказа;

β — коэффициент, определяющий предельно допустимое отклонение трудоемкости.

Из приведенного соотношения в развитие метода определения этого критерия [2] получим обобщенный критерий технологической устойчивости поточной линии ремонта вагонов (вагоносборочного участка или цеха) для различных вариантов организации процесса:

$$K_\theta \approx \frac{z_p^2 \left(\frac{T_{\max}}{\Theta} - \frac{T_{\min}}{\Theta_{\min}} \right)^2}{\left(\frac{\tilde{T}}{\Theta} \right)^2 36 p_3 (\beta^2 - 2\beta + 1)} < 1,$$

где $\Theta_{\max}, \Theta_{\min}, \tilde{\Theta}$ — максимальное, минимальное и приведенное число ремонтных

$$\begin{aligned}
& 29,07p^{20} + 2,66 \cdot 10^4 p^{19} + 1,01 \cdot 10^7 p^{18} + 2,09 \cdot 10^9 p^{17} + 2,64 \cdot 10^{11} p^{16} + 2,16 \cdot 10^{13} p^{15} + \\
& 1,17 \cdot 10^{15} p^{14} + 4,28 \cdot 10^{16} p^{13} + 1,01 \cdot 10^{18} p^{12} + 1,45 \cdot 10^{19} p^{11} + 1,08 \cdot 10^{20} p^{10} + 2,63 \cdot 10^{20} p^9 + \\
& 1,48 \cdot 10^{21} p^8 + 2,59 \cdot 10^{19} p^7 + 4,93 \cdot 10^{18} p^6 + 4,51 \cdot 10^{16} p^5 + 7,68 \cdot 10^{14} p^4 + 3,19 \cdot 10^{12} p^3 + \\
& 1,76 \cdot 10^{10} p^2 + 2,76 \cdot 10^7 p + 3,57 \cdot 10^4 = 0.
\end{aligned} \tag{1}$$

позиций, которое может быть использовано на поточной линии с гибким маневрированием (при жестком цикле работы $\Theta_{\max} = \Theta_{\min} = \bar{\Theta} = \Theta$; при этом Θ – число

ремонтных позиций на одной поточной линии).

Если $K_g < 1$, то можно считать, что разброс трудоемкостей мал и вагоноборочный участок (цех) будет работать устойчиво (не требуется выравнивание трудоемкостей). Если $K_g > 1$, то вагоноборочный участок (цех) действует неустойчиво, а если $K_g = 1$ – на границе устойчивости.

Под математической устойчивостью производственного процесса (участка или ремонтного депо) как системы автоматического регулирования (управления) следует понимать в обозначенных условиях свойство системы после прекращения действия внешнего возмущения возвращаться в заданное или близкое к нему состояние динамического равновесия (область устойчивости или живучести), которое оценивается критерием устойчивости.

УПРАВЛЯЮЩИЕ ДЕЙСТВИЯ

Представим вагонное ремонтное депо как систему управления, подчиняющуюся требованию основного кибернетического закона о необходимом разнообразии и быстроедействии. При условии достижения достаточного уровня автоматизации производственных процессов и процессов управления вагонное депо можно рассматривать как автоматизированную систему управления [3].

Состояние вагонного депо как системы автоматического управления (регулирования) характеризуется большим числом входных величин. Однако лишь малая их часть участвует в реальном процессе. Наиболее значимой или существенной переменной является производительность. Все остальные переменные – типы ремонтируемых вагонов, их собственники, место размещения депо, параметры вагоноб-

рочного участка – не входят в параметрические выражения и не оказывают непосредственного влияния на систему управления.

Поскольку главным параметром результативности вагонного депо служит производительность, то и задача контролирующего процесс заключается в ее регулировании. Поэтому математическая модель вагонного депо как системы автоматического регулирования должна описывать совокупность технологических машин разного назначения и их взаимодействие с позиций теории автоматического управления.

В работе [3] дано решение этой задачи для случая представления депо как линейной САР производительности по отклонению с использованием аппарата передаточных функций типовых линейных динамических звеньев. С учетом этого получено характеристическое уравнение вагоноборочного участка депо как САР производительности, представляющее собой полином двадцатой степени (1).

Численные значения коэффициентов характеристического уравнения соответствуют одному из устойчивых состояний системы регулирования производительности. Приведенная модель вагоноборочного участка депо учитывает наличие четырех ремонтных позиций, оснащенных комплексом автоматизированных машин (моечная машина с механизмом загрузки-выгрузки и механизмом перемещения кожуха, правильная, сварочная и сборочная машины) и соответствующих машин ручного действия, которые имитируются запаздывающими звеньями (транспортерами). Полученная математическая модель депо как САР позволяет выбирать такие параметры производственных процессов и технологических машин, которые обеспечивали бы заданную (нормированную) производительность в условиях устойчивой (по критерию Рауса) работы системы автоматического регулирования.



Под *устойчивостью развития* производственного объекта понимается процесс его постоянного перехода из одного состояния в другое, более эффективное (под действием внешних возмущений и управленческих решений) за счет интенсификации режимов работы, внедрения инновационных технологий и гибких автоматизированных машин.

Надежность процессов производства, в которых задействованы машины и трудовые коллективы, определяет их способность к бесперебойному выпуску годной продукции в размерах, обусловленных заданными производственной программой и фондом времени. Так как производственные процессы осуществляются благодаря комплексу организационно-технологических управляющих действий (решений), реализация которых способствует достижению конечного результата производства, то надежность отражает и меру действенности организационно-технологических решений или организационно-технологическую надежность (ОТН). В качестве критерия ОТН при этом выступает [4] вероятность достижения конечного результата производства (выпуск качественной продукции) в установленные сроки при наличии частичных отказов машин и ошибок персонала, устраняемых за счет внутренних ресурсов.

Предполагаем, что этот показатель идентичен вероятности того, что отклонение длительности производственного цикла (считается случайной величиной, имеющей нормальное распределение) от его нормированного значения не будет превосходить некоторого числа δ [4]:

$$p(|t - \bar{t}| < \delta) = \Phi\left(\frac{\delta}{\sigma}\right),$$

где t – фактическая продолжительность производственного цикла;

$\bar{t}$ – нормированное значение продолжительности производственного цикла;

$\Phi\left(\frac{\delta}{\sigma}\right)$ – табличная функция;

σ – среднее квадратичное отклонение.

Величина отклонения фактической продолжительности производственного цикла от нормированной не должна превосходить 5–10%.

СПОСОБЫ ОПТИМИЗАЦИИ

Моделирование – исследование и построение производственных процессов путём создания моделей, отражающих структуру процессов, характеристики объектов и потоки информации.

При моделировании процессов развития производства должны предусматриваться прогнозирование информации, влияющей на основные производственные показатели, пропускные способности, динамика состояния, наличие тех или иных случайных и неопределённых факторов.

Модель – абстрактная система, которая, отображая или воспроизводя объект исследования, способна замещать его с некоторой степенью приближения и даёт возможность получать необходимую информацию об этом объекте.

Правильный выбор математической модели зависит от понимания задачи, цели действий и критерия эффективности. Руководитель, использующий результаты исследований, должен знать и понимать, какая математическая логика была применена, какие факторы учтены, а какие остались вне расчетов и, следовательно, подлежат качественной оценке. В каждом отдельном случае модель имеет свою степень приближения, поэтому следует сравнивать ее результаты с экспериментальными данными или результатами, полученными на других моделях.

Вагонные ремонтные депо представляют собой сложные производственные системы, которые действуют независимо от колебаний трудоемкости и типа вагонов, поступающих в ремонт. Поскольку моменты поступления вагонов (требований) в плановый ремонт нельзя полностью считать случайными (накопитель имеет определенный запас неисправных вагонов), то и подобные схемы организации не могут в полной мере отвечать требованиям систем массового обслуживания. Значит, для их исследования не представляется возможным применять достаточно надежно разработанный математический аппарат, предусмотренный теорией массового обслуживания.

Оптимизация восполняет погрешности модельных схем, становясь процессом

нахождения оптимального (наилучшего) варианта из совокупности всех решений, попадающих в область допустимых значений параметров какой-либо задачи при заданных критериях.

Для оптимизации параметров производственных процессов с учетом взаимодействия участков (цехов) может быть применен многошаговый алгоритм выбора оптимальных параметров производства, основанный на методологии системного подхода, концепции максимизации суммарного выигрыша, теории поиска оптимальных стратегий и идеи метода динамического программирования [5]. В этом алгоритме в качестве критерия оптимальности берется критерий Вальда. Оптимизация управления многошаговым производственным процессом сводится к нахождению такой последовательности управления на каждом шаге, которая обеспечивает максимальное значение суммарного максимального дохода.

Большинство задач оптимизации производственных процессов решаются методами математического программирования, в частности линейного. Модели линейного математического программирования обеспечивают расчет оптимизации производственных или транспортных систем. Основная задача при этом состоит в определении из всех неотрицательных решений заданной системы линейных алгебраических уравнений такого решения, при котором целевая функция принимает наименьшее или наибольшее значение.

Как правило, целевая функция C линейно зависит от элементов решения x и представляет собой сумму расходов или прибыли:

$$C = \sum_{i=1}^n c_i x_i,$$

где c_i — стоимость единицы продукции или затраты на ее производство;

x_i — объем выпуска продукции.

При этом ограничения, налагаемые на элементы решения, имеют вид линейных неравенств или равенств относительно x .

Для сведения прикладных производственных задач к основной задаче линейного программирования необходимо:

- поставить задачу (сформировать условия протекания производственного процесса);
- определить переменные;
- найти целевую функцию;
- правильно сформировать ограничения;
- выбрать метод решения.

С помощью моделей линейного программирования решаются задачи оптимизации использования ресурсов, загрузки оборудования, распределения мощностей, доставки запасных частей (транспортная задача), плана производства продукции и др.

Транспортные задачи линейного программирования возникают при планировании перевозки грузов. В одних случаях они применяются для определения такого плана, при котором минимизируется стоимость перевозки, а в других случаях — чтобы минимизировать время доставки грузов.

Для решения практических задач линейного программирования лучше всего применять Microsoft Excel — надстройку «поиск решения». Она позволяет находить оптимум целевой функции задачи планирования с помощью итерационного процесса перехода к улучшающимся планам.

Сформируем наиболее характерные задачи линейного программирования по оптимизации производственных процессов вагоноремонтного производства с учетом разбора реальных ситуаций [6].

РАСЧЕТЫ ПЛАНА ПРОИЗВОДСТВА

Сварочное отделение вагонно-ремонтного депо осуществляет наплавку фрикционных планок, фрикционных клиньев и тяговых хомутов на одной автоматизированной установке. Отделение должно выпускать в смену длительностью $T_{см} = 720$ мин не менее N_1 — планок, N_2 — клиньев и N_3 — тяговых хомутов. План производства может быть перевыполнен в определенных пределах. Планок можно выпустить сверх плана





Таблица 1

Ремонтируемое изделие	Затраты сварочной проволоки, кг/шт.	Затраты флюса, кг/шт.
Планка	$a_{11} = 0,44$	$a_{12} = 0,22$
Клин	$a_{21} = 0,6$	$a_{22} = 0,3$
Тяговый хомут	$a_{31} = 4,4$	$a_{32} = 2,2$

$\leq \beta_1 N_1$, клиньев $\leq \beta_2 N_2$, тяговых хомутов $\leq \beta_3 N_3$. Примем $\beta_1 = 1,1$; $\beta_2 = 1,15$; $\beta_3 = 1,2$.

Для наплавки используются сварочная проволока и флюс, запасы материалов ограничены соответственно параметрами: $\gamma_1 = 140$ кг и $\gamma_2 = 70$ кг. Затраты материалов на каждое изделие известны и представлены в таблице 1. Предполагаемый выпуск продукции: $N_1 = 64$ шт.; $N_2 = 61$ шт.; $N_3 = 16$ шт.

Пусть за наплавку планки начисляется $\Pi_1 = 100$ руб.; клина $\Pi_2 = 300$ руб.; тягового хомута $\Pi_3 = 1500$ руб. Затраты времени на наплавку деталей соответственно составляют $T_1 = 2,2$ мин/шт., $T_2 = 3$ мин/шт., $T_3 = 24$ мин/шт.

Требуется так спланировать производство, чтобы план был выполнен или перевыполнен, а суммарная прибыль обращалась в максимум.

Решение. Составим математическую модель. Обозначим количество выпуска планок — x_1 ; клиньев — x_2 ; тяговых хомутов — x_3 .

Целевую функцию, которую надо максимизировать и которая линейно зависит от переменных, запишем так:

$$C = \Pi_1 x_1 + \Pi_2 x_2 + \Pi_3 x_3 \rightarrow \max.$$

Сформируем ограничения. Условия выполнения плана:

$$x_1 \geq N_1; x_2 \geq N_2; x_3 \geq N_3.$$

Условия отсутствия излишней продукции:

$$x_1 \leq \beta_1 N_1; x_2 \leq \beta_2 N_2; x_3 \leq \beta_3 N_3.$$

Условия соответствия запасов сварочной проволоки ее расходу:

$$a_{11} x_1 + a_{21} x_2 + a_{31} x_3 \leq \gamma_1.$$

Условия соответствия запасов флюса его расходу:

$$a_{12} x_1 + a_{22} x_2 + a_{32} x_3 \leq \gamma_2.$$

Условия соответствия продолжительности работ длительности смены:

$$x_1 T_1 + x_2 T_2 + x_3 T_3 \leq T_{см}$$

Условия неотрицательности и целочисленности значений переменных:

$$x_i \geq 0; x_i = \text{целое}.$$

Таким образом, поставленная задача сводится к следующему: *найти такие неотрицательные значения переменных x_i , чтобы они удовлетворяли ограничениям-неравенствам и одновременно обращали в максимум линейную функцию C этих переменных.*

В ходе решения получаем: $C_{\max} = 49900$ руб.; $x_1 = 64$ шт.; $x_2 = 65$ шт.; $x_3 = 16$ шт.

ВАРИАНТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ

В сварочном отделении депо имеются две сварочные установки. Одна оснащена автоматической головкой АБС, другая — полуавтоматом, использующим сплошную сварочную проволоку.

Установки используются для наплавки изношенных фрикционных планок, клиньев и тяговых хомутов. Параметры сварки и производства заданы таблицей 2.

Требуется при заданной длительности смены $T_{см} = 720$ мин определить количество продукции Π_j планок, клиньев и тя-

говых хомутов, которое следует наплавить на установке A_i так, чтобы задание по номенклатуре было выполнено при условии минимизации убытков из-за простоя оборудования. Убыток от простоя сварочных установок составляет $C_1 = 300$ руб./мин,

$C_2 = 170$ руб./мин. Поскольку две установки работают одновременно, T выполне-

Таблица 2

Изделие	Длина шва, м	Скорость сварки, м/мин		Длительность сварки, мин		План выпуска
		АБС	Полуавтомат	АБС	Полуавтомат	
Планка	2,2	0,6	0,33	3,7	6,67	64
Клин	3	0,6	0,33	5	9	61
Тяговый хомут	21,6	0,6	0,33	36	65,5	16

ния плана равно наибольшей из величин t_1 или $t_2 - T = \max(t_1, t_2)$.

Целевую функцию, которая должна быть минимальна, представим в таком виде:

$C = (T_{см} - t_1)C_1 + (T_{см} - t_2)C_2 \rightarrow \min.$

Решение. Для наплавки x_{11} на первой установке (АБС) требуется согласно установленной производительности $3,7 x_{11}$ мин; для наплавки клиньев — $5 x_{12}$ мин; тяговых хомутов — $36 x_{13}$ мин. Следовательно, общее время наплавки всех видов изделий на первой установке составит:

$t_1 = 3,7x_{11} + 5x_{12} + 36 x_{13}.$

Аналогично общее время наплавки этих изделий на второй установке (сварочный полуавтомат):

$t_2 = 6,67x_{21} + 9x_{22} + 65,5x_{23}.$

Запишем в виде формул ограничительные условия:

Условия ограничения выпуска:

$x_{11} + x_{21} = 64;$

$x_{12} + x_{22} = 61;$

$x_{13} + x_{23} = 16.$

Условия использования длительности смены:

$t_1 \leq T_{см};$

$t_2 \leq T_{см}.$

Условия целочисленности и неотрицательности значений переменных:

$x_{ij} = \text{целое};$

$x_{ij} \geq 0.$

После применения надстройки «Поиск решения» получаем:

$x_{11} = 20; x_{12} = 50; x_{13} = 11;$

$x_{21} = 44; x_{22} = 11; x_{23} = 5.$

$C_{\min} = 3,4$ руб. Простаивает вторая установка — 0,02 мин.

Таблица 3

Дорога	П	α	с	Θ	ПВ	П*Θ	α*ПВ	с*П*Θ
A1	523	0,092	12400	104	600000	54392	55200	674460800
A2	513	0,089	12160	125	600000	64125	53400	779760000
A3	594	0,048	20560	69	600000	40986	28800	842672160
A4	522	0,068	17216	78	600000	40716	40800	700966656
A5	543	0,088	12800	97	600000	52671	52800	674188800
A6	493	0,034	17600	71	600000	35003	20400	616052800
A7	546	0,031	18400	68	600000	37128	18600	683155200
A8	602	0,058	17280	79	600000	47558	34800	821802240
A9	604	0,111	17224	83	600000	50132	66600	863473568
A10	633	0,072	16800	82	600000	51906	43200	872020800
A11	559	0,029	21600	69	600000	38571	17400	833133600
A12	610	0,107	22400	41	600000	25010	64200	560224000
A13	615	0,058	24400	19	600000	11685	34800	285114000
A14	538	0,054	18800	67	600000	36046	32400	677664800
A15	462	0,019	20000	58	600000	26796	11400	535920000
A16	604	0,042	23200	35	600000	21140	25200	490448000
		1		1145			600000	10911057424





Таблица 4

Θ1	Θ2	Θ3	Θ4	Θ5	Θ6	Θ7	Θ8
106	105	49	79	98	42	35	58
Θ9	Θ10	Θ11	Θ12	Θ13	Θ14	Θ15	Θ16
111	69	32	106	57	61	25	42

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛАНА РЕМОНТА

Целевая функция, выражающая общие затраты на деповской ремонт вагонов, записывается так:

$$C = \sum_{i=1}^n c_i P_i \theta_i \Rightarrow \min,$$

где c_i – себестоимость деповского ремонта одного приведенного вагона на i -й железной дороге;

$$P_i = \frac{N_i}{\theta_i} - \text{средний съём вагонов с одной ремонтной позиции, достигнутый на } i\text{-й железной дороге;}$$

N_i – годовой объем выпуска вагонов на i -й железной дороге;

θ_i – количество ремонтных позиций, имеющих на i -й железной дороге (изменяемые переменные).

В качестве ограничений принимаются следующие условия:

θ_i – целое; $\theta_i \geq 0$; $P_i \theta_i \geq \alpha_i ПВ$. Здесь

α_i – доля участия i -й железной дороги в деповском ремонте вагонов (статистические данные); $ПВ$ – общий годовой план деповского ремонта грузовых вагонов. Пусть $ПВ = 600000$ вагонов.

Формируем таблицу данных. Вводим данные и формулы в ячейки электронной таблицы 3. В ходе решения получаем новые значения переменных (таблица 4).

Текущие затраты снизились примерно на 2,2%. Общее число позиций составляет 1075, что ниже исходного примерно на 6%.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПОСТАВОК ЗАПАСНЫХ ЧАСТЕЙ

Постановка задачи связана с минимизацией затрат на перевозку. Предположим, что на складе № 1 и складе № 2 железной дороги имеются запасы комплектов деталей для тележек грузового вагона (пружинные, фрикционные планки, фрикционные

клинья) соответственно A_1 и A_2 кг. Эти комплекты доставляются в три депо ВчДр1, ВчДр2 и ВчДр3 исходя из их потребностей B_1 , B_2 и B_3 . Масса комплекта деталей на одну тележку составляет 415 кг (масса двух комплектов из семи двухрядных пружин – 325 кг; масса комплекта фрикционных планок – 38 кг; масса комплекта фрикционных клиньев – 52 кг). Пусть запас деталей на складе № 1 $A_1 = 7000$ кг, а на складе № 2 – $A_2 = 5450$ кг. Потребности: $B_1 = 4000$ кг, $B_2 = 4300$ кг, $B_3 = 4150$ кг. Стоимость доставки: $c_{11} = 5$ руб./кг; $c_{12} = 1,5$ руб./кг; $c_{13} = 1$ руб./кг; $c_{21} = 6$ руб./кг; $c_{22} = 4$ руб./кг; $c_{23} = 2$ руб./кг.

Требуется определить оптимальные объемы X_{ij} поставок запасных частей в депо. Цель: среди всех неотрицательных решений X_{ij} выбрать такие, при которых целевая функция затрат C принимает минимальное значение

$$C = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^3 c_{ij} X_{ij} \Rightarrow \min.$$

Запишем ограничения:

1. Условия соответствия запасов потребностям:

$$\sum_{i=1}^2 A_i = \sum_{j=1}^3 B_j.$$

2. Условия соответствия объемов поставки запасных частей потребностям:

$$\sum_{i=1}^2 X_{ij} = B_j, j = 1, 2, 3.$$

3. Условия соответствия объемов поставок запасам:

$$\sum_{j=1}^3 X_{ij} = A_i, i = 1, 2.$$

4. $X_{ij} = 0$.

В ходе решения получаем:

$$x_{11} = 0; x_{12} = 4299; x_{13} = 2701;$$

$$x_{21} = 4000; x_{22} = 1; x_{23} = 1449;$$

$$C_{\min} = 36051,5$$

ВЫВОДЫ

В статье сформированы принципы организации производственных процессов ремонта вагонов, теоретические положения по оценке их устойчивости, организационно-технологической надежности и моделированию с помощью различных подходов. Предложен критерий оценки сопряженности пропускных способностей участков производства, получены зависимости для определения технологической и математической устойчивости процессов ремонта вагонов, исследованы варианты оптимизации параметров производства на основе моделей линейного программирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Болотин М. М., Глазков В. Н. Вагонное депо: критерии качества // Мир транспорта. — 2012. — № 5. — С. 12–15.
2. Болотин М. М., Воротников В. Г. Моделирующие алгоритмы и автоматизация расчетов // Мир транспорта. — 2008. — № 3. — С. 100–109.
3. Болотин М. М. Математические модели инженерного анализа вагонных депо // Мир транспорта. — 2005. — № 3. — С. 4–15.
4. Болотин М. М., Сергеев К. А., Кривич О. Ю. САПР вагоноремонтного производства. Автоматизированное проектирование вагоноремонтного производства. — М.: МИИТ, 2011. — 79 с.
5. Болотин М. М., Воротников В. Г., Козлов М. В. Математические методы структурного анализа машин и оптимизации параметров производства // Наука и техника транспорта. — 2009. — № 2. — С. 56–64.
6. Болотин М. М. Автоматизированные рабочие места вагоноремонтного производства. Часть 2: Поиск решений. Модели и экспертиза производства: Учеб. пособие. — М.: МИИТ, 2008. — 126 с. ●

PRINCIPLES OF ORGANIZATION AND SIMULATION OF RAIL CAR MAINTENANCE PROCESSES

Bolotin, Mikhail M. – D. Sc. (Tech), professor of the department of railway cars and wagon facilities of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia.

Glazkov, Vladimir N. – Ph.D. (Tech), associate professor, vice rector for international relations of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia.

Vorotnikov, Valery G. – Ph.D. (Tech), associate professor of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia.

The authors substantiate the approaches towards assessment of stability and reliability of the processes of car repairs, the principles of industrial engineering in car repairs shed, and relevant mathematical and technological models. They show

modes of solution of optimization problems by linear programming method, including computation of production plans, equipment operation, distribution of scheduled maintenance works, spare parts supply.

Key words: management theory, railway, automation, car maintenance, mathematical modeling, linear programming, stability of industrial process, technological reliability, indices of assessment, optimization.

REFERENCES

1. Mikhail M. Bolotin, Vladimir N. Glazkov Car Shed: Quality Criteria. *Mir Transporta* [World of Transport and Transportation] *Journal*, 2012, Vol. 43, No 5, pp.12–15.

2. Mikhail M. Bolotin, Valery G. Vorotnikov Simulative Algorithms and Computation Automatization. *Mir Transporta* [World of Transport and Transportation] *Journal*, 2008, Vol. 23, No 3, pp.100–109.

3. Mikhail M. Bolotin Mathematical Models of Engineering Analysis of Railway Cars Roundhouses. *Mir Transporta* [World of Transport and Transportation] *Journal*, 2005, Vol. 11, No 3, pp.4–15.

4. Bolotin M. M., Sergeev K. A., Krivich O. Yu. Computer-aided design of car maintenance. [*SAPR vagonoremontnogo proizvodstva. Avtomatizirovannoe*

proektirovanie vagonoremontnogo proizvodstva]. Moscow, MIIT, 2011, 79 p.

5. Bolotin M. M., Vorotnikov V. G., Kozlov M. V. Mathematical methods of structural analysis of machines and of optimization of productive indices [*Matematicheskie metody strukturnogo analiza mashin i optimizatsii parametrov proizvodstva*]. *Nauka i tehnika transporta* [Transport Science and Technics], 2009, № 2, pp. 56–64.

6. Bolotin M. M. Automated workplaces of car maintenance industry [*Avtomatizirovannye rabochie mesta vagonoremontnogo proizvodstva*]. Part 2: In search for solutions. Models and expertise of production activities [*Poisk resheniy. Modeli i ekspertiza proizvodstva*]. Teaching aid. Moscow, MIIT, 2008, 126 p.

Координаты авторов (contact information): Болотин М. М. (Bolotin M. M.) – (495) 684–22–32, Глазков В. Н. (Glazkov V. N.) – glazkovvn@mail.ru, Воротников В. Г. (Vorotnikov V. G.) – gpsdepo@mail.ru.

Статья поступила в редакцию / article received 03.12.2012
Принята к публикации / article accepted 25.12.2012

