

УДК 519.876.5

КОМБИНИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ ПЛАНИРОВАНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ АЭРОПОРТА

В.В. Захаров, Н.А. Барашенков (Санкт-Петербург)

Введение

Перспективным направлением повышения связанности территории Российской Федерации является создание и развитие гетерогенных транспортно-логистических систем (ТЛС) и, в частности, интенсификация использования грузовых отсеков судов гражданской авиации для доставки попутных грузов. В настоящее время на практике задачи планирования операции дозагрузки бортов решаются вручную, что приводит к выработке неоптимальных и несвоевременных управленческих решений.

В докладе основное внимание уделено постановке и решению задач планирования транспортно-логистических процессов. Рассматривается совокупность операций дополетного обслуживания разнотипных воздушных средств на территории аэропорта.

1. Состояние исследований

Содержание решаемой в докладе задачи сводится к следующему. Необходимо, учитывая все основные пространственно-временные, технические, технологические ограничения, определяющие специфику функционирования ТЛС (см. рис 1), осуществить поиск наиболее предпочтительного плана управления ТЛС, который в ходе реализации обеспечил бы наилучшее (с точки зрения заданных целевых функций) качество доставки попутных грузов.

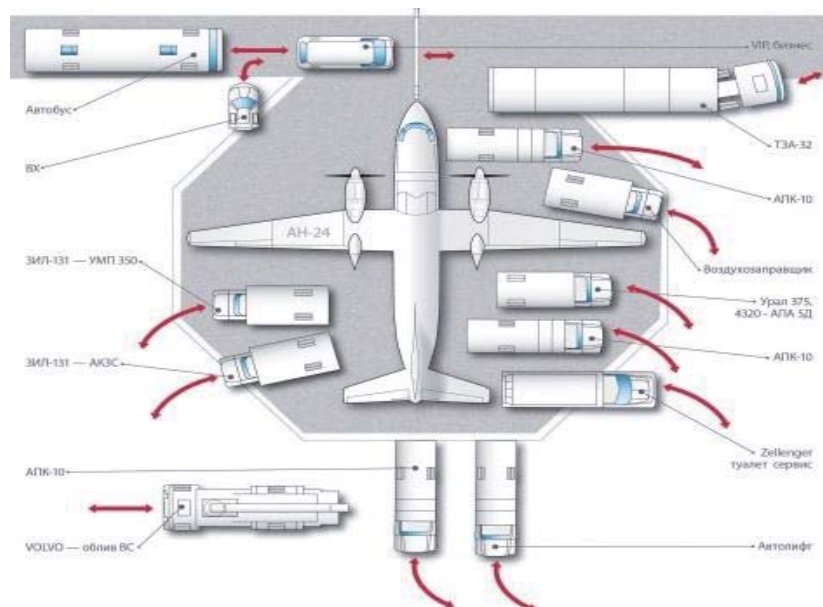


Рис. 1. Визуализация процесса обслуживания судна перед вылетом

Сформулированная задача имеет сложный комбинированный характер и представляет собой объединение задачи цеха (Reconfigurable Job Shop Scheduling) и задачи динамической маршрутизации транспорта с зависимыми от времени временами проезда (DVRPTT) [1,2].

Будем исходить из классификации методов и алгоритмов решения задач теории расписаний, которая приведена ниже (см. рис. 2).

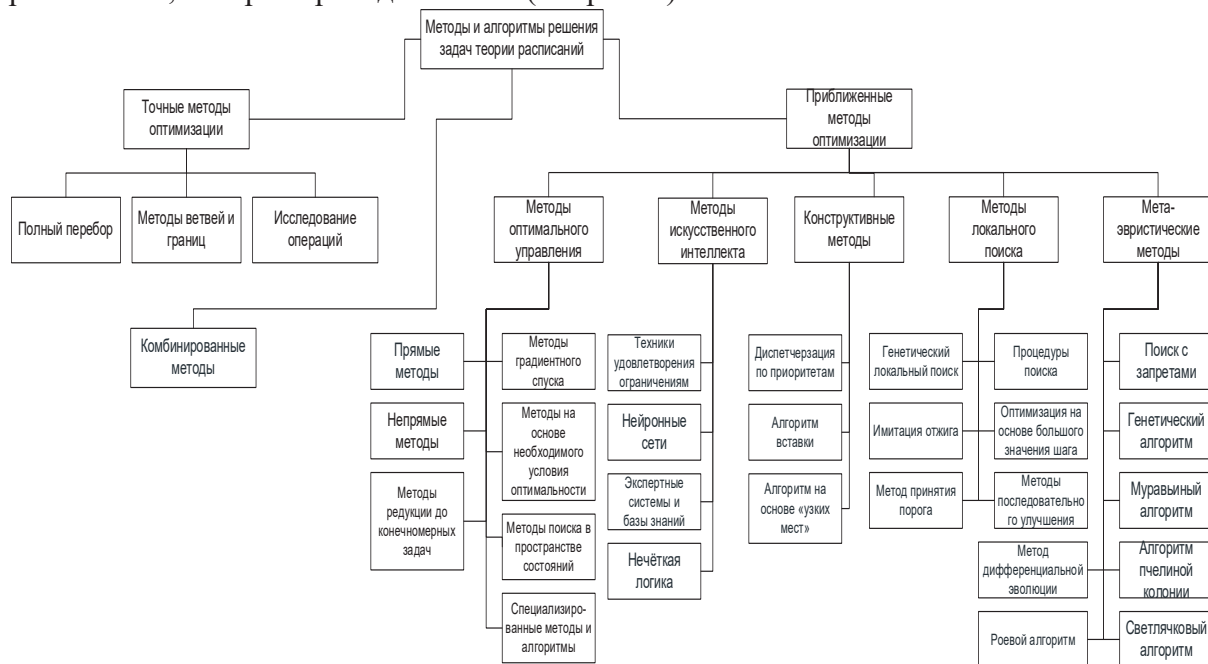


Рис. 2. Расширенная классификация классических и современных методов и алгоритмов решения задач теории расписаний.

Для решения рассматриваемых в докладе задач, наряду с традиционными методами комбинаторной и дискретной оптимизации в последнее время широкое применение нашли методы и алгоритмы, развиваемыми в рамках классической и современной теории управления (теория проактивного управления структурной динамикой) [3,4].

Анализ показывает, что использование классических подходов приводит к существенным временным вычислительным затратам, вызванным большой размерностью и комбинаторным характером исследуемых транспортно-логистических процессов. В рамках существующих подходов к решению частных задач планирования работ в ТЛС зачастую не выполнялись основные требования системного подхода, что конкретно проявлялось в:

- значительной несогласованности процессов функционирования элементов и подсистем, входящих в состав ТЛС;
- возникновении «пиковых» нагрузок (материальном и информационном уровнях);
- отсутствии ориентации задач планирования на повышение эффективности применения ТЛС.

Кроме того, при указанном подходе к решению задач планирования не учитывались современные тенденции и перспективы развития ТЛС, связанные с их интеграцией и возможными вариантами управления структурной динамикой данных систем [5].

Для повышения эффективности технологий авиаперевозок в грузовых отсеках пассажирских воздушных судов необходимо разработать новое методическое обеспечение (модели, методы, алгоритмы) и прототип программного модуля решения задач планирования нестационарных транспортно-логистических задач своевременной доставки, обработки и заполнения попутными грузами взаимосвязанной системы багажных отсеков разнотипных транспортных средств (наземных и воздушных),

входящих в состав наземно-авиационной транспортно-логистической системы и имеющих ситуационно изменяющиеся массогабаритные характеристики.

2. Содержательная постановка задачи

На территории аэропорта расположены пункты хранения грузов (склад) и суда гражданской авиации (стоки), которые характеризуются местоположением (координатами) и доступным пространством для дозагрузки. Отметим, что оно становится известно за 40 мин до вылета рейса, т.е. после окончания регистрации пассажиров. Заявки на перевозку грузов поступают в систему по заданным законам распределения, которые получены на основе обработки статистических данных от транспортных компаний.

Для каждого маршрута транспортного средства (ТС) по территории аэропорта задано время прохождения, включающее в себя время передвижения и выполнения подготовительных и сопутствующих операций: маневрирование, погрузка, разгрузка на складе и борта. Допускается возможность изменения параметров маршрутной сети в зависимости от погодных условий, состояния парка ТС и инфраструктуры, административных решений и др. Изменения могут состоять в ограничении пропускной способности, запрете перемещения по определенным маршрутам для всех или некоторых ТС и др.

Требуется разработать сценарий транспортировки грузов из источников в стоки так, чтобы удовлетворить потребности стоков, учитывая территориальное расположение узлов маршрутной сети, доступность и технические характеристики элементов аэропортовой инфраструктуры, состояние маршрутной сети. При этом синтезируемый план должен быть эффективным по потреблению ресурсов в широком смысле (стоимостных, материальных, энергетических, организационных и т.д.).

3. Формальная постановка задачи

Приведем модель потенциальных возможностей ТЛС аэропорта. Введем базисные множества:

$A_l = \{a_1, a_2, \dots, a_l\}$ – множество транспортных средств (ТС); каждый ТС A_l характеризуется набором параметров $A_l P$ (грузоподъемность, скорость передвижения, объем);

$S_i = \{s_1, s_2, \dots, s_i\}$ – множество источников (склады, места перегрузки «в поле») S_i характеризуется набором параметров $S_i P^g$ (величина запасов каждого груза k -го типа в истоке S_i);

$D_j = \{d_1, d_2, \dots, d_j\}$ – множество стоков (суда гражданской авиации). Каждый сток D_j характеризуется набором параметров $S_i P$ (объем доступного багажного отделения, максимальная перевозимая масса груза, величина потребностей в грузе k -го типа в стоке D_j);

$G_k = \{g_1, g_2, \dots, g_k\}$ – множество типов грузов; каждый груз G_k характеризуется набором параметров $S_i P$ (вес, объем).

Для характеристики потенциальных возможностей рассматриваемой ТЛС введем следующие отношения, характеризующие [6]:

- контактный потенциал пары «ТС-сток»

$$\varphi_1(a, d) = \begin{cases} 1, & \text{если ТС } a \text{ может обслуживать судно } d; \\ 0 & \text{— иначе;} \end{cases}$$

$$r_1 = \langle A, D; R_1 \rangle, R_1 = \{\langle a, d \rangle | \varphi_1(a, d) = 1\}; \quad (1)$$

- контактный потенциал пары «ТС-груз»

$$\varphi_2(a, g) = \begin{cases} 1, & \text{если ТС } a \text{ может перевозить груз } g; \\ 0 & \text{— иначе;} \end{cases}$$

$$r_2 = \langle A, G; R_2 \rangle, R_2 = \{\langle a, g \rangle | \varphi_2(a, g) = 1\}; \quad (2)$$

- контактный потенциал пары «сток-тип груза»

$$\varphi_3(d, g) = \begin{cases} 1, & \text{если судно } d \text{ может перевозить груз } g; \\ 0 & \text{— иначе;} \end{cases}$$

$$r_3 = \langle D, G; R_3 \rangle, R_3 = \{\langle d, g \rangle | \varphi_3(d, g) = 1\}; \quad (3)$$

Приведем следующую теоретико-множественную конструкцию, отражающую статический аспект в рассматриваемой задаче планирования функционирования ТЛС аэропорта:

$$\Omega = \langle A_l, S_i, D_j, G_k \rangle; \quad (4)$$

$$S = \langle \Omega, r_1, r_2, r_3 \rangle. \quad (5)$$

М – маршрутную сеть зададим набором:

$$M = \langle S_i, D_j, \Gamma, V_f \rangle, \quad (6)$$

где $\Gamma = \{\Gamma_f\}$ – карта (граф) маршрутов с привязкой к элементам ТЛС аэропорта; $V_f = \{V_f(A_l, Y_p)\}$ – множество матриц затрат ресурсов из множеств ресурсов $Y_p = \{y_1, y_2, \dots, y_p\}$ при использовании ТС A_l на маршруте Γ_f .

Согласно пространственно-технологическим и организационным ограничениям предполагается, что расписание прибытия и отправления судов *предопределяет* использование аэропортовой инфраструктуры, т.е. маршруты движения ТС и, в сущности, время движения.

План транспортировки заданного количества единиц груза G_k по маршруту Γ_f с использованием ТС A_l далее обозначим, $X_c = \{x_c = x(G_k, \Gamma_f, A_l)\}$. Сформулируем обобщенную оптимизационную постановку задачи:

$$I(X, M, Q, S_i, \Xi) \rightarrow \max_{x_c^* \in X_c}, \quad (7)$$

где $I = \{I_1, I_2, \dots\}$ – векторный показатель качества решения задачи синтеза плана функционирования ТЛС аэропорта по выбранному множеству показателей; Ξ – множество внутренних и внешних возмущающих воздействий. $Q = \{Q(A_l, G_k)\}$ – множество матриц, которые задают приоритеты доставки груза k -го типа в сток D_j .

Ключевым показателем качества планирования функционирования рассматриваемой ТЛС аэропорта является своевременность выполнения операций, связанных с обслуживанием борта, т.к. задержка вылета рейса приводит к штрафам, которые существенно превышают прибыль от доставки грузов. В практической плоскости ключевым вопросом является дисциплина обслуживания очереди заявок (доставка грузов G_k в город N бортом D_j), которая в текущих условиях формируется вручную диспетчерами с помощью эвристического метода FIFO.

Таким образом, необходимо найти план функционирования ТЛС, который удовлетворяет приведенным ограничения. Если таких планов несколько, то среди них необходимо выбрать тот, при котором обобщенный показатель качества принимает экстремальное значение. Сформулированная оптимизационная задача является большемерной, нестационарной, многокритериальной задачей теории расписаний.

4. Полимодельный комплекс планирования функционирования транспортно-логистической системы аэропорта

Для решения поставленной задачи применяется подход, основанный на последовательной декомпозиции [5, 7]. Предлагается опираться на методологию системного моделирования и комплексного описания процессов функционирования ТЛС. Проведенный анализ существующего модельно-алгоритмического обеспечения решения задач теории расписаний показал, что целесообразно для их описания использовать комбинированные решения, в фундамент которого следует положить аналитико-имитационные модели. Согласование (координацию) разработанного полимодельного комплекса предложено проводить на основе параметрической адаптации [8, 9].

Разработанный полимодельный комплекс (ПМК) состоит из двух основных моделей – логико-динамической модели программного управления операциями, потоками ресурсами ТЛС и имитационной модели (ИМ) функционирования ТЛС. Представим обобщенную динамическую модель (билинейную), описывающую процессы планирования (программного управления) функционирования ТЛС на основе концепции управления структурной динамикой [10]

$$W = \left\{ \begin{array}{l} \mathbf{u}(t) | \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t); \\ \mathbf{h}_0(\mathbf{x}(t_0)) \leq \mathbf{0}; \mathbf{h}_1(\mathbf{x}(t_f)) \leq \mathbf{0}; \\ \mathbf{q}^{(1)}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \mathbf{0}; \mathbf{q}^{(2)}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \leq \mathbf{0}; \end{array} \right\}, \quad (8)$$

где функции и переменные имеют следующую интерпретацию:

$\mathbf{x}$ – это вектор состояния ТЛС ($\mathbf{x} = \|\mathbf{x}^{(o)T} \mathbf{x}^{(p)T} \mathbf{x}^{(\delta)T}\|^T$) на уровне операций, потоков, ресурсов (индексы о, р, δ);

$\mathbf{u}$ – вектор управляющих воздействий (программ, планов) ($\mathbf{u} = \|\mathbf{u}^{(o)T} \mathbf{u}^{(p)T} \mathbf{u}^{(\delta)T}\|^T$);

$\mathbf{h}_0, \mathbf{h}_1$ – функции, задающие исходные данные для задачи программного управления функционированием ТЛС, начальный момент времени, а также граничные (требуемые) значения вектора состояния в момент окончания интервала управления;

$\mathbf{q}^{(1)}$ и $\mathbf{q}^{(2)}$ задают основные характерные ограничения описываемых процессов.

В систему логико-динамической модели (ЛДМ) комплексного планирования функционирования ТЛС входит система показателей качества:

$$\mathbf{J}^w = \|\mathbf{J}_{1-3}^{(o)T}, \mathbf{J}_{1-3}^{(p)T}, \mathbf{J}_{1-3}^{(\delta)T}\|^T, \quad (9)$$

которую можно разбить на три группы:

$\mathbf{J}_1$ – показатели, позволяющий провести оценивание своевременности выполнения операций;

$\mathbf{J}_2$ – показатели, оценивающие качество выполнения ТЛС операций;

$\mathbf{J}_3$ – показатели, характеризующий полноту выполнения ТЛС операций.

Ниже приведены элементы имитационной модели (ИМ), разработанной в среде Anylogic (см. рис. 3).

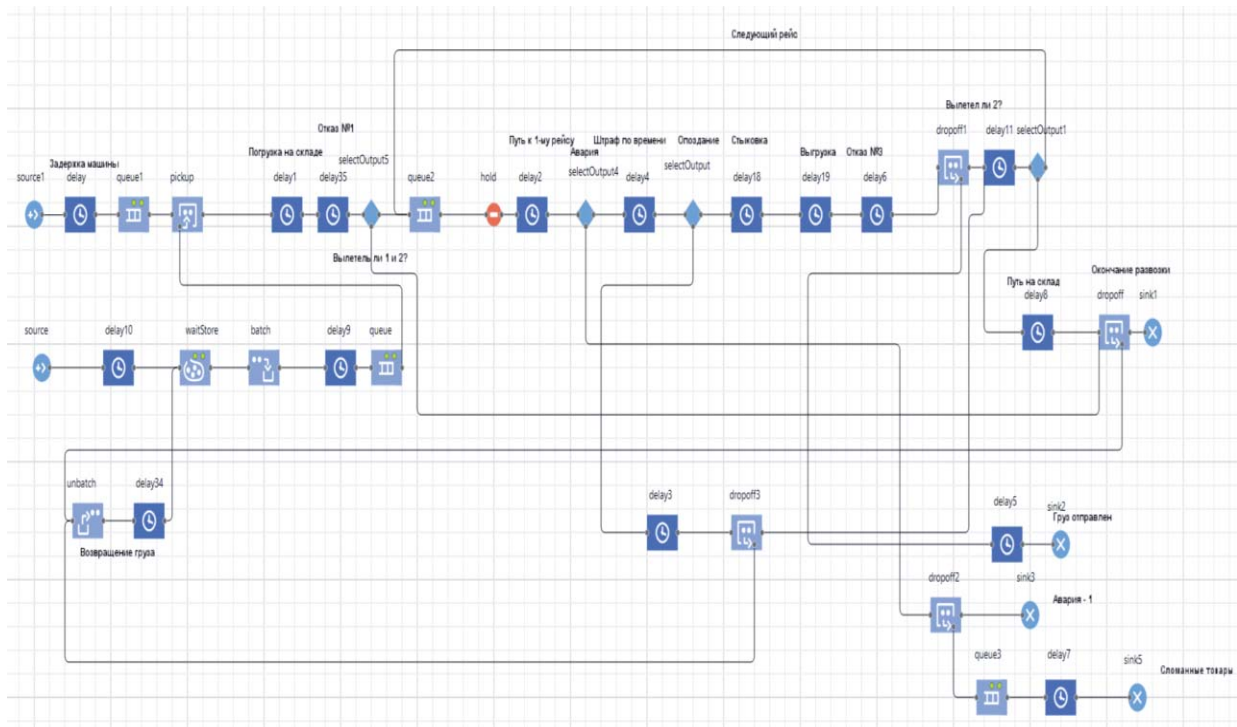


Рис. 3. Структурная схема имитационной модели функционирования ТЛС

Схема взаимодействия элементов ПМК приведена ниже (см. рис. 4)

Значения сопряженных переменных
(приоритеты операций)

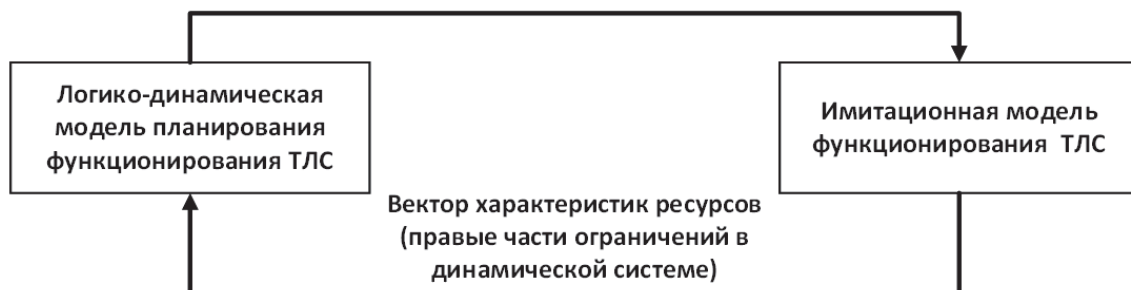


Рис. 4. Схема взаимосвязи элементов ПМК

4. Алгоритм решения задачи планирования функционирования ТЛС

Приведем комбинированный алгоритм решения задачи планирования функционирования ТЛС.

Шаг 1. Формирование логико-динамической модели планирования.

Шаг 2. Решение задачи оптимального программного управления функционированием ТЛС (см. [11]).

Шаг 3. Сохранение эталонного плана дозагрузки судов гражданской авиации, т.е. вектора управляющих воздействий и значений сопряженных переменных.

Шаг 4. Ввод исходных данных, полученных по результатам решения задачи с использованием ЛДМ, в имитационную модель планирования, а именно: список рейсов, подлежащих обслуживанию; приоритеты ТЛС операций.

Шаг 5. Запуск процедуры оптимизации (генетический алгоритм) элементов ТЛС в ИМ.

Шаг 6. Передача вектора характеристик параметров ТС, полученных с использованием в ЛДМ, т.е. формирование ограничений динамической системы (см. (8)).

Шаг 7. Выход из алгоритма, т.е. окончание итерационного процесса поиска (выбора) плана функционирования ТЛС заканчивается в том случае, когда после окончания шага 6 выполняется условие:

$$|J^{opt} - J^{sm}| < \varepsilon, \quad (10)$$

где J^{sm} – это обобщенный показатель качества плана функционирования ТЛС;

ε – заданная величина.

Иначе возврат к шагу 4.

Достоинством приведенной процедуры является то, что на конструктивном уровне удастся учесть все основные пространственно-временные, технические и технологические ограничения, связанные с нелинейностью, нестационарностью функционирования ТЛС в условиях внешних и внутренних возмущающих воздействий, при формальном описании которых в рамках «монолитной» постановки задачи возникают трудности [12, 13].

5. Описание разработанного программного модуля планирования функционирования ТЛС

Разработаны два основных модуля планирования функционирования ТЛС, которые, в сущности, представляют реализацию элементов ПМК: «Планирование», «Имитация». Вычислительный алгоритм первого разработан на языке Python 3.9. Интерфейс ввода исходных данных в расширенной нотации BPMN 2.0 с помощью языка JavaScript. Ниже представлен пример описания процессов ТЛС с использованием шлюза «И» (конъюнкция) (см. рис. 5).

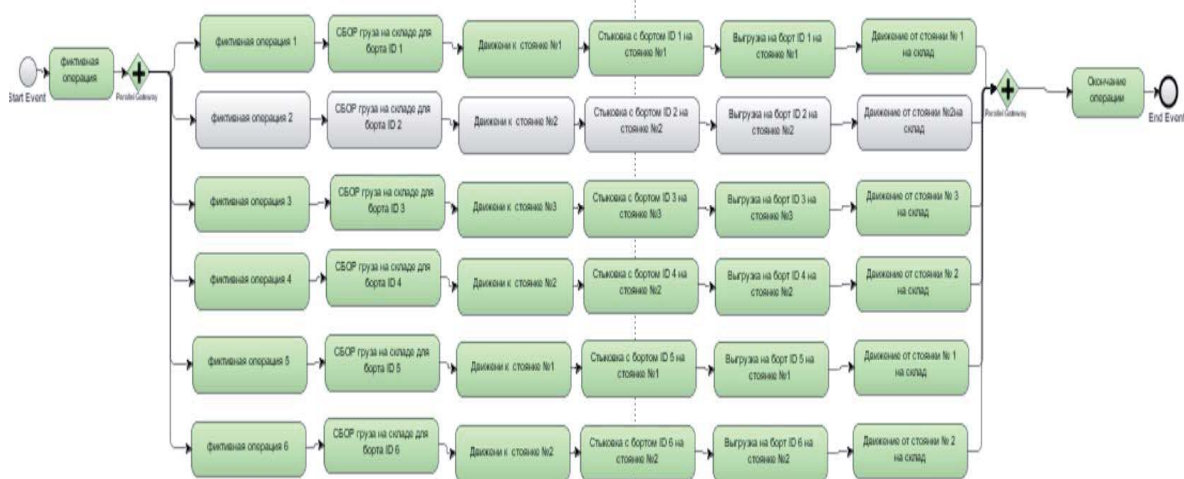


Рис. 5. Упрощенное описание процесса функционирования ТЛС в нотации BPMN 2.0

Ниже приведен пример описания «временных окон», где под исполнителем понимается ТС (см. рис. 6).

```

208 <resource id="RS_2" name="Исполнитель">
209   <resourceParameter id="RS_2_P_1" name="name" />
210   <resourceParameter id="RS_2_P_2" name="threads" />
211   <resourceParameter id="RS_2_P_3" name="productivity" />
212   <extensionElements>
213     <ltsm:props availability_time="30" availability_value="1"/>
214     <ltsm:props availability_time="90" availability_value="0"/>
215     <ltsm:props availability_time="120" availability_value="1"/>
216   </extensionElements>

```

Рис. 6. Пример описания «окон видимости» элементов ТЛС

Подобные временные ограничения задаются для операций аналогичным способом.

Программный модуль «Имитационное моделирование» разработан с использованием среды имитационного моделирования Anylogic.

6. Пример решения задачи планирования функционирования ТЛС аэропорта

В качестве исходных данных для моделирования появления заявок было использовано расписание вылетов. Задержки вылетов задаются с помощью законов распределения, полученных на основе анализа статистических данных функционирования авиакомпаний. Время движения ТС до борта определяется расположением стоянок судов. При этом ограничения на пропускную способность маршрутной сети устанавливаются на основе правил, которые действуют на территории аэропорта.

Операции могут иметь следующие атрибуты: объем операций и время, необходимое на выполнение, «окна видимости» (расписания вылетов борта и рабочие часы ТС); штрафные функции за нарушение директивных сроков выполнения операций; количество ТС, которые одновременно могут выполнять операцию; максимальная дифференциальная интенсивность выполнения операций.

Ниже приведены обобщенные результаты решения задачи с использованием модуля «Планирование» (см. табл.1).

Таблица 1. Пример описания результатов использования модуля «Планирование»

ID – рейса	ID стоянки	Направление	ТС	Операция	Приоритет операции
1	1	GYD	А	Сбор груза	25 499
				Движение	11 112
				Стыковка	10 668
				Выгрузка	7 124
				Движение на склад	2 380

Операции, которые вошли в план (программы, вектор управления), и значения сопряженных переменных, которые получены по результатам решения задачи оптимального программного управления функционированием ТЛС (приоритеты операций) передаются в ИМ (см. рис 3).

ID Рейса	Начало сборки	Конец сборки	Начало погрузки	Конец погрузки на складе	Начало движения от склада до стоянки	Конец движения от склада до стоянки	Начало стыковки	Конец стыковки	Начало выгрузки	Конец выгрузки	Количество перевозимого груза
1	0:30	0:37	0:37	0:41	1:45	1:49	1:49	1:52	1:52	2:00	220
3	1:55	2:02	2:02	2:05	2:32	2:41	2:41	2:43	2:43	2:50	300
5	4:15	4:22	4:22	4:25	6:33	6:37	6:37	6:40	6:40	6:47	300
4	4:10	4:17	4:17	4:21	6:33	6:39	6:39	6:41	6:41	6:49	300
6	7:20	7:27	7:27	7:30	8:01	8:07	8:07	8:09	8:09	8:17	240
8	7:50	7:57	7:57	8:00	8:11	8:15	8:15	8:17	8:17	8:25	200
9	8:30	8:37	8:37	8:41	8:57	9:04	9:04	9:06	9:06	9:14	260
11	10:10	10:17	10:17	10:20	12:14	12:22	12:22	12:25	12:25	12:33	250
13	12:15	12:22	12:22	12:25	14:19	14:26	14:26	14:28	14:28	14:35	210
15	18:30	18:37	18:37	18:41	20:50	20:59	20:59	21:01	21:01	21:08	280
16	20:30	20:37	20:37	20:41	20:54	20:59	20:59	21:02	21:02	21:09	290
17	22:30	22:37	22:37	22:40	23:16	23:24	23:24	23:26	23:26	23:34	230
18	22:50	22:57	22:57	23:01	23:23	23:28	23:28	23:30	23:30	23:38	230

Рис. 7. Упрощенное описание процесса функционирования ТЛС в нотации BPMN 2.0

Значения приоритетов в ИМ используются в случае возникновения конфликтов, т.е. ресурсов недостаточно (в т.ч. ТС). Подобные ситуации возникают в случае влияния факторов внутренней и внешней среды на процессы функционирования ТЛС.

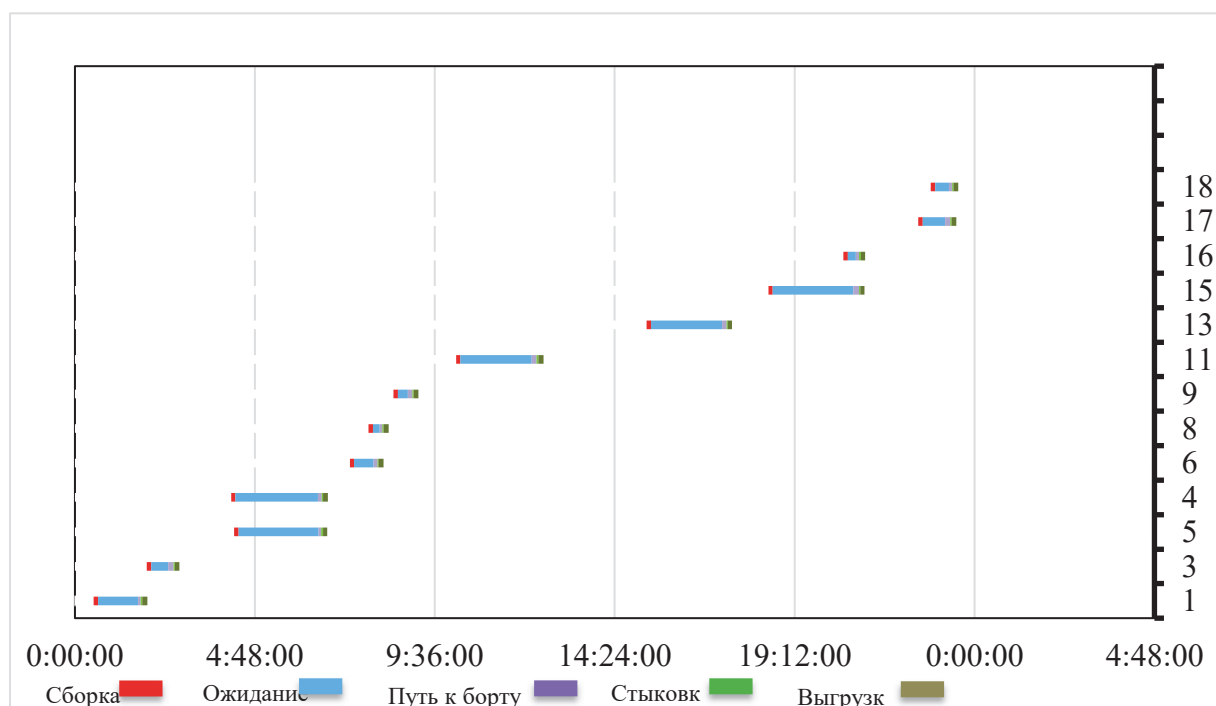


Рис. 8. Результаты реализации оптимального плана в ИМ

Выводы

По результатам проведенных экспериментов сформулированы следующие выводы:

1. интервалы времени между вылетами рейсов являются наиболее существенным факторами, которые оказывают влияние на показатели полноты, скорости и своевременность доставки попутных грузов в ТЛС;
2. задержки вылетов рейсов могут как положительными, так и негативными факторами; если новое время отправление рейса «освобождает» ТЛС для решения

целевых задач и назначается на операции, находящиеся в менее «загруженном» временном интервале;

3. установлено, что применение предложенного подхода к планированию функционирования ТЛС позволяет до 11% снизить интенсивность использования ресурсов; до 6% повысить значение показателя своевременности выполнения операций; до 4% повысить скорость выполнения операций при сохранении значений показателей полноты выполнения работ.

По результатам анализа проведенных экспериментов было установлено, что технология планирования функционирования ТЛС должна включать, во-первых, этап адаптации параметров и структур моделей, алгоритмов планирования и регулирования работы элементов ТЛС к прошлому и текущему состоянию, внешней среды, во-вторых, этап имитации возможных сценариев реализации планов функционирования ТЛС с учётом различных вариантов регулирования его элементами и подсистемами, в-третьих, процедуру адаптации самих процессов планирования работ элементов ТЛС к возможным (прогнозируемым на имитационных моделях) состояниям ТЛС и внешней среды.

Представленные модели можно использовать как на этапах прогнозирования возможностей ТЛС и планирования их работы (на этапах перспективного, долгосрочного, оперативного планирования), так и на этапе реализации плана.

Заключение

Дальнейшие исследования целесообразно проводить в направлении разработки методического обеспечения и технологий автоматизации параллельного скоординированного решения задач многокритериального динамического структурно-функциональный синтез программ функционирования ТЛС на материальном и информационном уровнях, которые позволят, во-первых, оперативно передавать актуальные данные об операциях в систему мониторинга состояния сложных объектов [14], а, во-вторых, качественно и своевременно обеспечивать доставку попутных скоропортящихся грузов с использованием взаимосвязанной системы багажных отсеков в удаленные регионы РФ.

Благодарности. Исследования, выполненные по данной тематике, проводились в рамках бюджетной темы FFZF-2025-0020.

Литература

1. **Чернышев Ю.О., Кубил В.Н.** Обзор динамических задач маршрутизации транспорта // Программные продукты и системы. 2020. Т. 33. №. 3. С. 491-501.
2. **Doh, H. H., Yu, J. M., Kwon, Y. J., Lee, D. H., Suh, M. S.** Priority scheduling for a flexible job shop with a reconfigurable manufacturing cell // Industrial Engineering & Management Systems. 2016. Т. 15. №. 1. С. 11-18.
3. **Семёнов А.И., Соколов Б.В., Спесивцев А.В.** Комплексный подход к решению задач планирования в кормопроизводстве // Онтология проектирования. 2025. Т. 15. №. 2 (56). С. 198-210.
4. **Охтилев М.Ю. Охтилев, П.А., Соколов, Б.В., Юсупов, Р.М.** Методологические и методические основы проактивного управления жизненным циклом сложных технических объектов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2022. Т. 65. №. 11. С. 781-788.
5. **Захарова А.А., Кутахов В.П., Мещеряков Р.В., Подвесовский А.Г., Смолин А. Л.** Моделирование задач транспортировки грузов в беспилотной авиационной транспортной системе // Авиакосмическое приборостроение. 2023. №. 3. С. 3-15.

6. **Калинин В. Н., Соколов Б. В.** Динамическая модель процесса переналадки приборов активного подвижного объекта // Дифференциальные уравнения. 1987. Т. 23. №. 9. С. 1626-1629.
7. **Григорьева Е.Д., Ушаков В.А.** Модель и алгоритм решения транспортно-логистической задачи своевременной доставки грузов с использованием группировки робототехнических комплексов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2025. №. 2.
8. **Микони С. В., Соколов Б. В., Юсупов Р. М.** Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов. М. : РАН, 2018. – 314 с.
9. **Кокорин С.В., Рыжиков Ю.И.** Оптимизация параметров сетей массового обслуживания на основе комбинированного использования аналитических и имитационных моделей // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2010. Т. 53. №. 11. С. 61-66.
10. **Соколов Б.В., Юсупов Р.М.** Научные основы интеграции методологий менеджмента и кибернетики для повышения эффективности проактивного управления социо-кибер-физическими системами // Системный анализ в проектировании и управлении. – 2021. Т. 25. №. 1. С. 30-41.
11. **Zakharov V.** Method of dynamic multi-criteria quality assessment and optimization for proactive complex objects functioning schedules // International Conference on Intelligent Information Technologies for Industry. – Cham : Springer Nature Switzerland, 2023. – С. 303-312.
12. **Аничкин А.С., Семенов В.А.** Современные модели и методы теории расписаний // Труды Института системного программирования РАН. 2014. Т. 26. №. 3. С. 5-50.
13. **Ушаков В.А.** Модели и алгоритмы управления информационными процессами при взаимодействии подвижных объектов //Морские интеллектуальные технологии. – 2022. №. 3-1. С. 235-247.
14. **Захаров В.В.** Основы автоматизации процессов проактивного мониторинга обобщенных состояний сложных агробиотехнических объектов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2024. Т. 67. №. 11. С. 918-927.