

СПЕЦИАЛЬНОЕ МОДЕЛЬНО-АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПЛАНИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ГРУППИРОВКИ ПОДВИЖНЫХ МОРСКИХ ОБЪЕКТОВ

В.В. Захаров, Б.В. Соколов, В.А. Ушаков (Санкт-Петербург)

Введение. Анализ функционирования существующих и перспективных группировок подвижных морских объектов (ПдМО) показывает, что неотъемлемой частью данного процесса является информационное взаимодействие составляющих их элементов и подсистем. Целевые обеспечивающие и вспомогательные операции современных сложных морских систем, в состав которых входят ПдМО, требуют непрерывной информационной поддержки, а нестрогое (эмпирическое) решение задач, возникающих на данном этапе, может привести к таким негативным последствиям как потеря данных и информации, приводящим в конечном итоге к ухудшению качества управления отдельными ПдМО и сложных морских систем в целом [1–2].

Другой важной проблемой, связанной с решением задач планирования и программного управления информационными процессами (ИнП) при взаимодействии ПдМО, является большое количество подсистем и связей в рассматриваемых большеразмерных динамических объектах, определяющих сложность их функционирования. Традиционно для решения данных задач программного управления широко применяются логико-динамические модели. Однако исследователям в этом случае приходится сталкиваться с целым рядом алгоритмических и вычислительных проблем, связанных с необходимостью учета нестационарности описываемых процессов информационного взаимодействия, их нелинейности, которая возникает при задании технологических ограничений, связанных с функционированием ПдМО, типа «И», «ИЛИ», «АЛЬТЕРНАТИВНОЕ ИЛИ», а также ограничений, вызванных разрывностью операций. К настоящему времени разработано большое количество подходов, позволяющих на конструктивном уровне решить перечисленные проблемы [3]. Вместе с тем, при увеличении размерности решаемых задач планирования информационных процессов (ИнП) в ходе функционирования ПдМО затраты времени на получение соответствующих планов начинают возрастать. В этих условиях необходимо искать альтернативные пути решения задач синтеза технологий и программ управления ИнП при взаимодействии ПдМО. Таким образом, тематика рассматриваемой статьи, посвященная разработке комбинированных моделей [3–5] и алгоритмов планирования ИнП при взаимодействии группировки ПдМО на основе использования фундаментальных и прикладных результатов, полученных в теории оптимального управления и исследовании операций, является **новой и актуальной** и имеет важное значение для проведения дальнейших перспективных исследований в различных предметных областях, в том числе и морской сфере.

Постановка задачи. При решении задачи планирования информационных процессов при взаимодействии ПдМО, описанной во введении, считаем, что известна группировка ПдМО, где для каждого конкретного объекта известны: максимальные объемы запоминающих устройств (ЗУ) ПдМО; максимальные производительности вычислительных средств (ВСр) ПдМО; максимальные пропускные способности каналов приема/передачи данных между ПдМО; минимально/максимально возможные значения интенсивности (скорости) приема/передачи и обработки данных в ПдМО; пропускные способности каналов приема/передачи и обработки данных в ПдМО. Кроме того, предполагалось, что известны следующие параметры операций, которые определяют структуру соответствующих ИнП,

а именно: объемы информации о состоянии контролируемых объектов (КнО), которые поступают в ПдМО; длительность интервалов постоянства структур (топологической, технической) ПдМО на конкретном промежутке времени; директивные сроки окончания выполнения операций, входящих в ИнП; штрафные функции за нарушение директивных сроков и сами структуры возможного информационного взаимодействия ПдМО на каждом из промежутков. Предполагается, что каждый ПдМО оборудован унифицированной многофункциональной аппаратурой, предназначенной для выполнения основных ИнП – хранения, приема, передачи и обработки данных.

Необходимо, используя перечисленные исходные данные, построить программу управления ИнП (план), которые реализуются при взаимодействии ПдМО, наилучшую с точки зрения заданных показателей качества. К указанным показателям качества будем относить показатель общего объема переданных и обработанных данных, показатель, характеризующий потери данных, показатель, характеризующий качество обработанных данных и своевременность их обработки.

Полученные результаты. Предварительный анализ показывает, что исследуемая задача программного управления (планирования) ИнП является большеразмерной, характеризуется сложными нелинейными нестационарными пространственно-временными техническими и технологическими ограничениями, а также требует особого подхода к учету факторов неопределенности, вызванных воздействиями факторов внешней среды и ее многокритериальным описанием [3–7].

В этом случае, как показали исследования, целесообразно провести последовательную декомпозицию исходной большеразмерной задачи планирования на задачи агрегированного планирования ИнП без привязки ко времени и взаимосвязанные с ними по исходным данным задачи детального планирования ИнП с привязкой ко времени.

Как и при всякой декомпозиции, для корректного восстановления разорванных связей требуется решение задачи координации, в результате чего должны быть заданы параметры координации, обеспечивающие пошаговую согласованность решений, полученных в рамках каждой из перечисленных задач. В основу такой декомпозиции следует положить учет специфики функционирования группировки (Гр) ПдМО (а точнее, ее управляемую структурную динамику), заключающейся в том, что несмотря на перемещение ПдМО, топологическая структура их информационных взаимодействий сохраняется постоянной в течение определенных интервалов времени (временных интервалов постоянства рассматриваемой структуры). На рис. 1 и 2 в графическом виде представлен предлагаемый вариант последовательной декомпозиции сформулированной задачи оперативного планирования ИнП при взаимодействии Гр ПдМО.

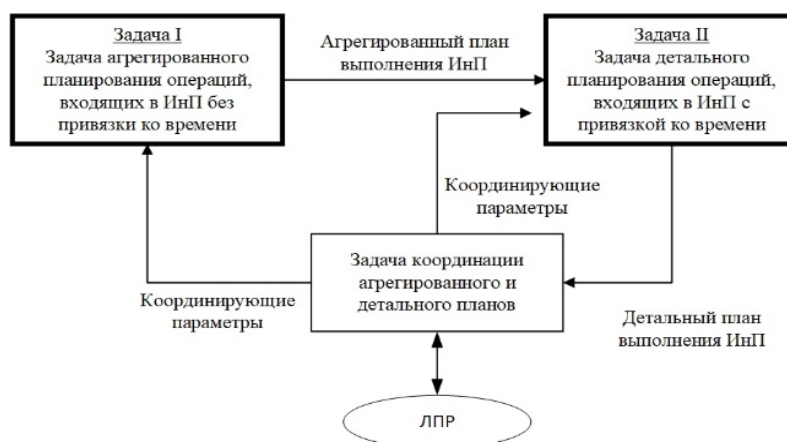


Рис. 1. Предлагаемая последовательная декомпозиция задачи планирования информационных процессов (ИнП) при взаимодействии Гр ПдМО

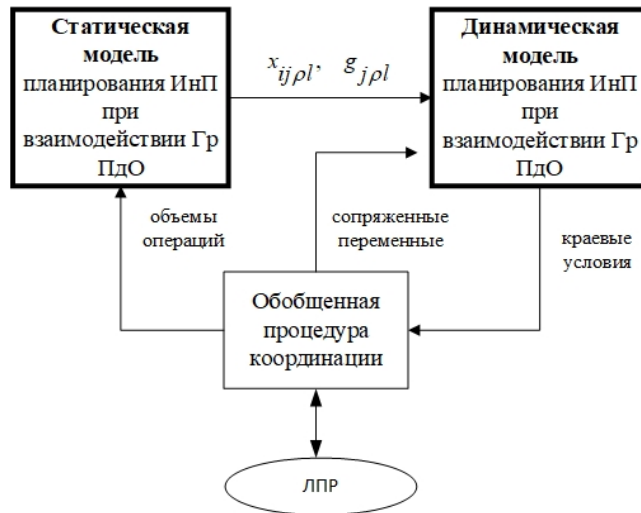


Рис. 2 Сценарий взаимодействия статической и динамической моделей планирования ИнП

Приведем описание статической модели (СМ). Пусть A – множество ПдМО, $A_i, A_j \in \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$, причем i, j – индексы ПдМО, а n их количество; ρ – тип данных (поток), для которого параметр P – количество типов данных (потоков). Пусть структура и характеристики ПдМО изменяются в дискретные моменты времени $(0, t_1, t_2, \dots, T)$, разбивающие весь интервал времени $t \in (0, T]$ (интервал планирования) на подынтервалы (промежутки), соответствующие постоянству структуры Гр ПдМО. Сопоставим произвольному подынтервалу $[t_{ol}, t_{fl}] = T_l^{(o,1)}$ номер l , при этом $l = 1, \dots, L$, где L – количество участков, причем t_{ol} – начальный момент времени подынтервала постоянства структуры, t_{fl} – конечный момент времени участка постоянства структуры. Необходимо подчеркнуть, что в реальных условиях при взаимодействии ПдМО происходит обмен разнородными данными, имеющими различную степень важности и срочности, поэтому в модели введена переменная. Для большей наглядности в ограничимся 2 типами данных: обработанные данные – информация будет обозначаться как $\rho = 2$, необработанные данные будут обозначаться как $\rho = 1$.

С учетом вышеизложенного предлагаемая СМ планирования ИнП взаимодействия ПдМО примет следующий вид:

$$\alpha_1 I_1 - \alpha_2 I_2 = I_0 \rightarrow \max_{\bar{x} \in \Delta} \quad (1)$$

$$\text{где } I_1 = \sum_{\rho=1}^P \sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^L g_{j\rho l}, \quad I_2 = \sum_{\rho=1}^P \sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^L z_{j\rho l}, \quad \alpha_1 + \alpha_2 = 1, \quad \alpha_1, \alpha_2 \geq 0,$$

$$\Delta_{\square} = \left\{ \begin{array}{l} \bar{x} \mid \sum_{\rho \in P} x_{j\rho l}^{(ax)} = \left(\sum_{i \in M_j^{(+)}} x_{ij\rho l} - \sum_{i \in M_j^{(-)}} x_{ij\rho l} \right) + (y_{j\rho l} - y_{j\rho(l-1)}) + g_{j\rho l} + z_{j\rho l}; \\ 0 \leq \sum_{\rho \in P} x_{ij\rho l} \leq \psi_{ijl}; \quad 0 \leq \sum_{\rho \in P} (y_{j\rho l} + g_{j\rho l}) \leq V_j; \\ 0 \leq \sum_{\rho \in P} g_{j\rho l} \leq \varphi_{jl}; \quad 0 \leq z_{j\rho l}; \quad g_{j(\rho+1)l} = s_{\rho} g_{j\rho l}; \\ i, j = 1, 2, \dots, n; \quad \rho = 1, 2, \dots, P; \quad l = 1, 2, \dots, L \end{array} \right\}, \quad (2)$$

где \bar{x} – это вектор оптимизированных параметров, определяющий план выполнения операций, входящих в ИнП, и включающий в качестве компонентов параметры, характеризующие объемы переданных, принятых, сохраненных, обработанных, потерянных данных (информации).

Поясним значения параметров ПдМО: V_j – максимально возможный объем запоминающего устройства (ЗУ) в A_j ПдМО; φ_{jl} – максимальная интенсивность обработки данных в A_j ПдМО; ψ_{ijl} – максимальная интенсивность передачи данных между A_i и A_j ПдМО. Для проведения дальнейшей формализации введем следующие переменные: $x_{jl}^{(ex)}$

– объем данных, поступивших из внешней среды в ПдМО A_j на l -м подынтервале времени; $x_{ij\rho l}$ – объем данных, переданных из A_j ПдМО в A_j ρ -го типа на l -м участке времени; $y_{j\rho l}$, $g_{j\rho l}$, $z_{j\rho l}$ – параметры, характеризующие каждый соответственно: объем данных ρ -го типа на l -м подынтервале, который может быть записан (согласно плану работы Гр ПдМО) в ЗУ A_j ПдМО, либо обработан (согласно характеристикам аппаратуры) в A_j ПдМО, либо потерян в A_j ПдМО (из-за ограниченной пропускной способности каналов связи). Кроме того, пусть M_{jl}^- – множество ПдМО, из которых в A_j ПдМО на l -м участке времени передаются данные, а M_{jl}^+ – множество номеров ПдМО, в которые передаются данные из A_j ПдМО на l -м подынтервале времени; s_ρ – коэффициент, характеризующий требуемую степень обработки данных, в ходе которой они становятся информацией. Обозначим через I_1 – показатель полноты обработки данных в группировке ПдМО, I_2 – показатель потери данных в Гр ПдМО, I_0 – обобщенный показатель качества планирования ИнП, а α_1, α_2 – коэффициенты важности показателей (задаются ЛПР).

При формировании плана работы Гр ПдМО выбор наилучшей альтернативы осуществляется на основе модели оптимизации (1). Из анализа СМ следует, что предложенная формализация задачи планирования ИнП при взаимодействии ПдМО позволила ее свести к многокритериальной канонической (основной) задаче линейного программирования (ЛП) большой размерности, с блочной структурой матрицы ограничений и двухсторонними ограничениями на оптимизируемые переменные. Дальнейшая детализация полученного плана работы Гр ПдМО осуществляется с использованием ДМ планирования (программного управления) ИнП при взаимодействии ПдМО. Для этого объем данных, запланированных в СМ для передачи между ПдМО на каждом участке времени $x_{ij\rho l}$, а также объем данных, который запланирован в СМ для обработки в каждом ПдМО на каждом подынтервале времени $g_{j\rho l}$, передается в виде краевых условий в разработанную ДМ. Приведем обобщенное описание данной модели, подробное – в [13, 14]. Поясним значения параметров основной системы дифференциальных уравнений, с помощью которой осуществлена системно-кибернетическая интерпретация процессов планирования ИнП при их взаимодействии: $x_j^{(o,1)}$ – длительность нахождения Гр ПдМО на l -м участке постоянства структуры; $x_{ij\rho l}^{(n,1)}$ – количество данных типа ρ , переданных из A_i ПдМО в A_j на l -м подынтервале; $x_{j\rho l}^{(n,2)}$ – количество данных типа ρ , обработанных в A_j ПдМО на l -м участке; $x_{ij\rho l}^{(n,3)}$ – вспомогательная переменная, которая равна длительности интервала времени приема/передачи данных типа ρ от A_i ПдМО к A_j на l -м подынтервале; $x_{j\rho l}^{(n,4)}$ – вспомогательная переменная, которая равна

продолжительности обработки данных типа ρ в A_j ПдМО на l -м участке; $u_j^{(o,1)}(t)$ – булева переменная, значение которой соответствует смене или сохранению текущего подынтервала постоянства структуры; $u_{ij\rho l}^{(n,1)}(t)$ – интенсивность (скорость) приема/передача данных типа ρ от A_i ПдМО к A_j на l -м участке; $u_{j\rho l}^{(n,2)}(t)$ – интенсивность (скорость) обработки данных типа ρ в A_j ПдМО на l -м подынтервале; $\omega_{ij\rho l}^{(n,1)}(t)$ – управляющее воздействие, принимающее значение 1, если планируется операция приема/передачи данных, 0 – в противоположном случае; $\omega_{j\rho l}^{(n,2)}(t)$ – управляющее воздействие, принимающее значение 1, если планируется операция обработки данных, 0 – в противоположном случае, $c_{ij\rho l}^{(n,1)}$ и $c_{j\rho l}^{(n,2)}$ – заданные константы, выбранные таким образом, чтобы они соответствовали параметрам Ψ_{ijl} и Φ_{jl} из СМ, $d_{ijl}^{(1)}$ и $d_{jl}^{(2)}$ – пропускные способности каналов приема/передачи и обработки данных ПдМО соответственно, функции $\xi_{ij}^{(b,1)}$, $\xi_j^{(b,2)}$ задают возможные варианты возмущающих воздействий (целенаправленных, независимых, неизвестных, либо их комбинаций) на соответствующие компоненты Гр ПдМО со стороны внешней среды.

$$M^{(1)} = \left\{ \begin{array}{l} u_{ij\rho l}^{(n,1)}(t) | \dot{x}_{ij\rho l}^{(n,1)}(t) = u_{ij\rho l}^{(n,1)}(t), \quad \dot{x}_{ij\rho l}^{(n,3)}(t) = \omega_{ij\rho l}^{(n,1)}(t); \\ 0 \leq u_{ij\rho l}^{(n,1)}(t) \leq c_{ij\rho l}^{(n,1)} \omega_{ij\rho l}^{(n,1)}(t); \quad \omega_{ij\rho l}^{(n,1)}(t) \in \{0,1\}; \\ \sum_{i=1}^n \omega_{ij\rho l}^{(n,1)}(t) + \omega_{j\rho l}^{(n,2)}(t) \leq 1; \quad \sum_{\rho=1}^P u_{ij\rho l}^{(n,1)}(t) \leq d_{ijl}^{(1)}; \\ j \neq i \\ i, j = 1, 2, \dots, n; \rho = 1, 2, \dots, P; l = 1, 2, \dots, L \end{array} \right. \quad (3)$$

$$M^{(2)} = \left\{ \begin{array}{l} u_{j\rho l}^{(n,2)}(t) | \dot{x}_{j\rho l}^{(n,2)}(t) = u_{j\rho l}^{(n,2)}(t), \quad \dot{x}_{j\rho l}^{(n,4)}(t) = \omega_{j\rho l}^{(n,2)}(t); \\ 0 \leq u_{j\rho l}^{(n,2)}(t) \leq c_{j\rho l}^{(n,2)} \omega_{j\rho l}^{(n,2)}(t); \quad \omega_{j\rho l}^{(n,2)}(t) \in \{0,1\}; \\ \sum_{i=1}^n \omega_{ij\rho l}^{(n,1)}(t) + \omega_{j\rho l}^{(n,2)}(t) \leq 1; \quad \sum_{\rho=1}^P u_{j\rho l}^{(n,2)}(t) \leq d_{jl}^{(2)}; \\ j \neq i \\ j = 1, 2, \dots, n; \rho = 1, 2, \dots, P; l = 1, 2, \dots, L \end{array} \right. \quad (4)$$

Заданы следующие показатели эффективности управления ИнП при взаимодействии Гр ПдМО для оценивания качества программы управления ИнП. С помощью показателя (5) можно количественно оценить суммарный штраф за нарушение директивных сроков выполнения заданных операций, входящих в информационный процесс, показатель качества планирования вида (6) позволяет оценить общий объем обработанных (потерянных) данных и информации:

$$J_2 = \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^n \int_{t_0}^{t_{fl}} \gamma_{jpl}(t) \omega_{jpl}^{(n,2)}(t) dt; \quad (5)$$

$$J_4 = \frac{1}{2} \left[\sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left(x_{ijl} - \sum_{p=1}^P x_{ijpl}^{(n,1)}(t_{fl}) \right)^2 + \sum_{l=1}^L \sum_{j=1}^n \left(g_{jl} - \sum_{p=1}^P x_{jpl}^{(n,2)}(t_{fl}) \right)^2 \right]; \quad (6)$$

Задача поиска оптимальной программы управления ИнП (плана ИнП) при взаимодействии Гр ПдМО может быть сформулирована как задача оптимального программного управления обобщенной динамической системой [8]. Необходимо найти такую программу управления ИнП, которая позволит перевести рассматриваемую обобщенную динамическую систему (см. (3) – (4)) из заданного начального состояния в заданное конечное состояние с учетом технических и технологических ограничений и наилучшим образом с точки зрения показателей качества планирования. Если таких программ управления окажется несколько, необходимо из них выбрать наиболее предпочтительную с точки зрения обобщенного показателя качества программного управления ($J_{об}$), который задается целевой функцией следующего вида:

$$J_{об} = \lambda_2 \overset{J}{\square} 2 + \lambda_4 \overset{J}{\square} 4, \text{ где } \lambda_2 + \lambda_4 = 1, \overset{J}{\square} = \frac{J}{J^*}. \quad (7)$$

В (7) J_2 – нормированное значение показателя качества суммарного штрафа за нарушение директивных сроков выполнения операций, в рамках соответствующих ИнП; J_4 – нормированное значение показателя качества оценивания краевых условий; J^* – наилучшее (максимальное) значение показателя качества J ; λ – коэффициент важности показателя качества программного управления.

В докладе приводится обобщенная многоэтапная координационно-итерационная процедура расчета плана ИнВ Гр ПдМО. Параметрами координации в данной процедуре являются краевые условия и сопряженные переменные (динамические приоритеты операций, в сущности, множители Лагранжа). Данная процедура включает в себя следующие основные шаги:

Шаг 1. Расчет плана выполнения операций, входящих в ИнП при взаимодействии ПдМО с использованием СМ.

Шаг 2. Подготовка исходных данных (заданный в СМ объем данных, переданных между ПдМО на каждом участке времени и объем данных, который был запланирован в СМ для обработки в каждом ПдМО на каждом подынтервале времени) для передачи их из СМ в ДМ.

Шаг 3. По запросу пользователя в СМ выполняется сохранение исходных данных, а также исходных данных для ДМ (количество ПдМО и участков постоянства структуры) во временный файл *.mat.

Шаг 4. Оценка робастности плана выполнения операций (нечувствительность результатов планирования к изменению исходных данных), входящих в ИнП Гр ПдМО на СМ.

Шаг 5. По запросу пользователя в ДМ загружаются сохраненные данные из временного файла *.mat. В ДМ исходные данные из СМ используются в виде краевых

условий, которые учитываются при решении задачи планирования ИнП при взаимодействии ПдМО. В противоположном случае у пользователя есть возможность ввести эти данные вручную.

Шаг 6. Удаление временного файла *.mat.

Шаг 7. Итерационный поиск программного управления ИнП при взаимодействии Гр ПдМО с использованием ДМ на основе метода Крылова–Черноусько [9]. Если итерационный процесс сошелся, то осуществляется переход на шаг 9.

Шаг 8. В случае, когда не удалось за конечное число итераций получить программу управления ИнП Гр ПдМО с применением ДМ, осуществляется формирование сообщения об отсутствии сходимости, а также из имеющихся детальных планов выбирается наиболее предпочтительный. Далее осуществляется формирование координирующих параметров и возврат в СМ или ДМ для корректировки исходных данных с участием ЛПР.

Шаг 9. Оценка робастности полученного программного управления ИнВ Гр ПдМО, которая базируется на результатах использования комбинированного метода многокритериального принятия управленческих решений, основывающегося на методе последовательных приближений (МПП) и методе построения аппроксимированных областей достижимости (ОД) в пространстве показателей качества планирования.

Шаг 10. Формирование окончательного варианта агрегированного и детального планов выполнения ИнП при взаимодействии Гр ПдМО.

В докладе приводится численный пример расчета плана выполнения ИнП при взаимодействии Гр ПдМО, в состав которой вошли морские суда и беспилотные летательные аппараты, совместно осуществляющие мониторинг контролируемых объектов, располагающихся на водной поверхности.

Заключение

В докладе представлено оригинальное формальное описание и решение задачи программного управления (планирования) ИнП, происходящими при взаимодействии (функционировании) группировки ПдМО. Оригинальность подхода состоит в предлагаемой автором системно-управленческой интерпретации исследуемых процессов, позволившей на конструктивном уровне применить аппарат теории оптимального управления и математического программирования при синтезе планов и программ управления ИнП.

Разработано и реализовано в среде MatLab [10, 11] на программном уровне полимодельное (статико-динамическое) описание процесса оптимального управления ИнП, включающего в себя процессы приема, передачи, хранения, обработки и потери данных при взаимодействии ПдМО. В состав полимодельного описания вошли взаимосвязанные СМ и ДМ. Они дополняют и усиливают описательные возможности друг друга.

Проведены эксперименты с разработанным прототипом программного обеспечения. Основное достоинство предложенного модельно-алгоритмического обеспечения состоит в том, что за счет полимодельного описания удалось на конструктивном уровне описать разнотипные ограничения, связанные с функционированием современных ПдО с перестраиваемой структурой (технической, технологической, функциональной и т. д.), учет которых в каждой из отдельных моделей – СМ и ДМ – приводит к серьезным математическим и алгоритмическим проблемам.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-79-00301), <https://rscf.ru/project/22-79-00301/>.

Литература

1. **Бочарников А.И., Коваленко В.П., Коваленко А.В., Тихонычев В.В., Худяков А.В.** Космическая зональная съемка для определения скорости и ускорения подвижных объектов // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2021. Т. 8. № 1. С. 48–58. DOI: 10.30894/issn2409-0239.2021.8.1.48.58.
2. **Стариченков А. ., Модин Н.В.** Алгоритмы функционирования интеллектуальных систем управления морскими подвижными объектами // Транспорт России: Проблемы и перспективы – 2020: материалы Юбилейной международной научно-практической конференции (Санкт-Петербург, 10–11 ноября 2020). СПб.: ИПТ РАН, 2020. С. 121–125.
3. **Микони С.В., Соколов Б.В., Юсупов Р.М.** Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов. М.: РАН, 2018. 314 с. DOI: 10.31857/S9785907036321000001.
4. **Москвин Б.В., Михайлов Е.П., Павлов А.Н., Соколов Б.В.** Комбинированные модели управления структурной динамикой информационных систем // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2006. Т. 49, № 11. С. 7–11.
5. **Москвин Б.В.** Оптимизация передачи данных в вычислительной сети с коммутацией пакетов // Труды 5-й Всесоюзной конференции «КОМПАК-87». Рига, 1987. С. 168–171.
6. **Соколов Б.В., Ушаков В.А.** Модели и алгоритмы оперативного планирования информационных процессов в динамической сети, образованной подвижными объектами // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2022. № 683. С. 29–36.
7. **Захаров В.В.** Программно-математическое обеспечение процесса модернизации сложных объектов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 11. С. 975–984. DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-11-975-984.
8. **Болтянский В.Г.** Математические методы оптимального управления. М.: Наука, 1968. 408 с.
9. **Крылов И.А., Черноусько Ф.Л.** Алгоритм метода последовательных приближений для задач оптимального управления // Журнал вычислительной математики и математической физики. 1972. Т. 12. № 1. С. 14–34.
10. MATLAB Documentation [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mathworks.com/help/matlab/index.html> (дата обращения: 27.04.2022).
11. **Чен К., Джиблин П., Ирвинг А.** Matlab в математических исследованиях: пер. с англ. В. Е. Кондрашова и С. Б. Королева. М.: Мир, 2001. 346 с.
12. **Ушаков В.А.** Модельно-алгоритмическое обеспечение оперативного оценивания и анализа показателей качества управления информационными процессами // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2021. Т. 64. № 8. С. 688–692. DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-8-688-692.
13. **Ушаков В.А.** Комбинированные модели и алгоритмы планирования информационных процессов при взаимодействии подвижных объектов: дис....канд. техн. наук: 2.3.1. СПб.: СПб ФИЦ РАН, 2022. 181 с.
14. **Ушаков В.А.** Модели и алгоритмы управления информационными процессами при взаимодействии подвижных объектов // Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 3 часть 1. С. 235-247. DOI: 10.37220/MIT.2022.57.3.031.