

И. В. СОЛОВЬЕВА, О. И. СЕМЕНКОВ, Б. В. СОКОЛОВ

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ КОРРЕКЦИИ ПЛАНОВ РАБОТЫ КОРПОРАТИВНОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ПОЗИЦИОННОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

Рассматривается задача коррекции планов работы корпоративной информационной системы. Для ее решения предлагается использовать метод позиционной оптимизации, позволяющий корректировать план работы системы в режиме реального времени.

Ключевые слова: динамические модели программного управления, метод позиционной оптимизации, корпоративная информационная система.

Введение. В настоящей статье предлагается еще один вариант использования ранее построенной обобщенной динамической модели функционирования корпоративной информационной системы (ИС) при формальной постановке и решении задачи коррекции ее планов [1—3]. Напомним, что ранее в работах [2, 5] было показано, как указанную обобщенную модель можно использовать при постановке и решении задач оперативного (календарного) планирования работы различных систем активных подвижных объектов (АПО). К числу таких объектов относятся космические средства; транспортные средства воздушного, наземного и водного базирования, обеспечивающие интермодальные перевозки в цепях поставок; аппаратно-программные средства, входящие в состав современных „виртуальных предприятий“. При управлении такими объектами возникает необходимость формального описания и оперативного решения задач коррекции и перепланирования их работы, вызванная действием различных видов возмущений, имеющих как объективную, так и субъективную природу. В настоящей статье рассматривается задача коррекции планов работы корпоративной ИС с учетом текущей информации об ее состоянии в заданные дискретные моменты времени. Предполагается, что периодичность и состав информации, поступающей в указанные моменты времени, определяются на основе специальных методик [2]. Предварительные исследования показали, что при постановке и решении задачи коррекции плана работы корпоративной ИС целесообразно осуществлять поиск управляющих воздействий в классе дискретных кусочно-постоянных ограниченных функций, используя ранее предложенный метод позиционной оптимизации [6—8]. С помощью этого метода значения корректирующих воздействий, компенсирующих возмущения, определяются как позиционные решения вспомогательных (сопровождающих) задач оптимального управления. В основу метода позиционной оптимизации положены известные математические методы решения задач оптимального управления и адаптивные методы решения задач линейного программирования [6—8].

Обобщенная динамическая модель управления корпоративной информационной системой. Следуя работам [1, 3], рассмотрим обобщенную динамическую модель планирования работы корпоративной ИС, в состав которой будет включено несколько моделей. Введем следующие обозначения: $A = \{A_i; i = 1, \dots, n\}$ — множество целевых и обеспечивающих функционирование системы процессов; $B = \{B_j; j = 1, \dots, m\}$ — множество объектов (подсистем, элементов), входящих в состав системы; $D = \{D_k^i; k \in i = 1, \dots, S_i\}$ — множество операций, входящих в состав множества процессов A ; $P = \{P_\rho^i; \rho = 1, \dots, \Pi_i\}$ — множество информационных

потоков, образующихся при функционировании корпоративной ИС; $K = \{K_v \cup \tilde{K}_\mu; v = \overline{1, \dots, \omega}, \mu = \overline{1, \dots, \tilde{\omega}}\}$ — множество центров обработки информации (ЦОИ); $E = \{D_{v\mu}^{\tilde{i}}; \tilde{i} = \overline{1, \dots, \tilde{n}}, v = \overline{1, \dots, \omega}, \mu = \overline{1, \dots, \tilde{\omega}}, v \neq \mu\}$ — множество вспомогательных процессов, связанных с синхронизацией информации между основными ЦОИ (ОЦОИ) K_v и резервными ЦОИ (РЦОИ) \tilde{K}_μ .

Модель программного управления операциями, выполняемыми в корпоративной ИС, описывается выражениями

$$\dot{x}_{ik}^{(o,1)} = \sum_{j=1}^m \varepsilon_{ij}(t) \theta_{ikj} u_{ikj}^{(o,1)}(t); \quad \dot{x}_{v\mu\tilde{i}\rho}^{(o,2)} = u_{v\mu\tilde{i}\rho}^{(o,2)}(t), \quad i = \overline{1, \tilde{n}}, \quad v = \overline{1, \omega}, \quad \mu = \overline{1, \tilde{\omega}};$$

$$\dot{x}_i^{(o,3)} = u_i^{(o,3)}(t), \quad i = \overline{1, n}, \quad k = \overline{1, S_i},$$

где $\varepsilon_{ij}(t)$, $\theta_{ikj}(t)$ — известные булевы функции времени, такие что $\varepsilon_{ij}(t) = 1$, если процесс A_i находится в зоне взаимодействия с объектом (ресурсом) B_j , $\varepsilon_{ij}(t) = 0$ иначе; $\theta_{ikj}(t) = 1$, если на ресурсе B_j есть средства для выполнения операции D_k^i , $\theta_{ikj}(t) = 0$ иначе; $x_{ik}^{(o,1)}$ — переменная, характеризующая состояние выполнения операции D_k^i при реализации процесса A_i ; $x_{v\mu\tilde{i}\rho}^{(o,2)}$ — переменная, характеризующая состояние выполнения вспомогательного процесса $D_{v\mu}^{\tilde{i}}$, в ходе реализации которого должна осуществляться передача информации типа ρ из ОЦОИ K_v в РЦОИ \tilde{K}_μ ; $x_i^{(o,3)}$ — переменная, характеризующая состояние вспомогательной операции.

Соответствующие управляющие воздействия обозначены как $u_{ikj}^{(o,1)}(t)$, $u_{v\mu\tilde{i}\rho}^{(o,2)}(t)$, $u_i^{(o,3)}(t)$, при этом

$$u_{ikj}^{(o,1)}(t) = \begin{cases} 1, & \text{если операция } D_k^i \text{ выполняется} \\ & \text{при } A_i \text{ с использованием } B_j; \\ 0, & \text{иначе;} \end{cases} \quad u_{v\mu\tilde{i}\rho}^{(o,2)}(t) = \begin{cases} 1, & \text{если осуществляется передача} \\ & \text{информации типа } \rho \text{ из } K_v \text{ в } \tilde{K}_\mu; \\ 0, & \text{иначе;} \end{cases}$$

$$u_i^{(o,3)}(t) = \begin{cases} 1, & \text{в момент завершения процесса } A_i; \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

Ограничения и краевые условия модели задаются выражениями

$$\sum_{j=1}^m u_{ikj}^{(o,1)} \left[\sum_{\tilde{\alpha} \in \Gamma_{ik1}} \left(a_{i\tilde{\alpha}}^{(o,1)} - x_{i\tilde{\alpha}}^{(o,1)}(t) \right) + \prod_{\tilde{\beta} \in \Gamma_{ik2}} \left(a_{i\tilde{\beta}}^{(o,1)} - x_{i\tilde{\beta}}^{(o,1)}(t) \right) \right] = 0;$$

$$u_{v\mu\tilde{i}\rho}^{(o,2)} \left[\left(a_{S_i}^{(o,1)} - x_{S_i}^{(o,1)}(t) \right) + \left(a_{S_i}^{(p,1)} - x_{S_i}^{(p,1)}(t) \right) \right] = 0;$$

$$\sum_{j=1}^m u_{ikj}^{(o,1)} \leq 1 \quad \forall i = \overline{1, n}, \quad \forall k = \overline{1, S_i}; \quad \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{S_i} u_{ikj}^{(o,1)} \leq R_j^{(o,1)} \quad \forall j = \overline{1, m}; \quad \sum_{\tilde{i}=1}^{\tilde{n}} \sum_{\rho=1}^{\Pi_{\tilde{i}}} \sum_{\mu=1}^{\tilde{\omega}} u_{v\mu\tilde{i}\rho}^{(o,2)} \leq R_v^{(o,1)} \quad \forall v = \overline{1, \omega};$$

$$u_i^{(o,3)} \left(a_{iS_i}^{(o,1)} - x_{iS_i}^{(o,1)} \right) = 0; \quad u_{ikj}^{(o,1)}, u_{v\mu\tilde{i}\rho}^{(o,2)}, u_i^{(o,3)} \in \{0, 1\}; \quad \mathbf{h}_0^{(o)}(\mathbf{x}^{(o)}(t_0)) \leq \mathbf{0}, \quad \mathbf{h}_1^{(o)}(\mathbf{x}^{(o)}(t_f)) \leq \mathbf{0},$$

где $a_{i\tilde{\alpha}}^{(o,1)}$, $a_{i\tilde{\beta}}^{(o,1)}$, $a_{S_i}^{(o,1)}$, $a_{S_i}^{(p,1)}$, $a_{iS_i}^{(o,1)}$ — заданные величины (краевые условия), значения которых могут принять соответствующие переменные $x_{i\tilde{\alpha}}^{(o,1)}$, $x_{i\tilde{\beta}}^{(o,1)}$, $x_{S_i}^{(o,1)}$, $x_{S_i}^{(p,1)}$, $x_{iS_i}^{(o,1)}$ в момент времени

$t = t_f$; $\Gamma_{ik1}, \Gamma_{ik2}$ — множества номеров операций взаимодействия, проводимых с использованием объектов B_j и непосредственно предшествующих операции D_k^j ; заданные величины $R_j^{(o,1)}, R_v^{(o,1)}$ характеризуют соответственно пропускную способность (производительность) объектов (ресурсов) B_j и ОЦОИ K_v ; $\mathbf{h}_0^{(o)}, \mathbf{h}_1^{(o)}$ — известные дифференцируемые функции, задающие соответствующие краевые условия.

Показатели качества планирования работы корпоративной ИС в этом случае определяются следующим образом:

$$J_1 = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m \left[\sum_{k=1}^{S_j} \left(a_{ik}^{(o,1)} - x_{ik}^{(o,1)}(t_f) \right)^2 + \sum_{v=1}^{\omega} \sum_{\mu=1}^{\tilde{\omega}} \sum_{\rho=1}^{\Pi_i} \left(a_{v\mu\tilde{i}\rho}^{(o,2)} - x_{v\mu\tilde{i}\rho}^{(o,2)}(t) \right)^2 \right];$$

$$J_2 = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{S_i} \sum_{j=1}^m \int_{t_0}^{t_f} \alpha_{ik}^{(o,1)}(\tau) u_{ikj}^{(o,1)}(\tau) d\tau,$$

где $a_{ik}^{(o,1)}, a_{v\mu\tilde{i}\rho}^{(o,2)}$ — заданные величины, значения которых должны принять соответствующие переменные в конце интервала планирования; с помощью заданных функций $\alpha_{ik}^{(o,1)}(\tau)$ задаются штрафы за нарушение директивных сроков выполнения соответствующих операций; показатель вида J_1 позволяет оценить суммарную точность выполнения краевых условий (заданной технологии функционирования системы), а критериальная функция J_2 — суммарные потери за невыполнение директивных сроков реализации операций в системе.

Модель программного управления ресурсами корпоративной ИС представляется выражениями

$$\dot{x}_j^{(k)} = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{S_i} \theta_{ikj} u_{ikj}^{(o,1)}(t), j = \overline{1, m}; \mathbf{h}_0^{(k)}(\mathbf{x}^{(k)}(t_0)) \leq \mathbf{0}, \mathbf{h}_1^{(k)}(\mathbf{x}^{(k)}(t_f)) \leq \mathbf{0}; J_3 = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m (T - x_j^{(k)}(t_f))^2,$$

где переменная $x_j^{(k)}$ характеризует состояние ресурса (объекта) B_j в момент времени t ; $T = t_f - t_0$; $\mathbf{h}_0^{(k)}, \mathbf{h}_1^{(k)}$ — известные дифференцируемые функции, задающие соответствующие краевые условия; с помощью показателя качества планирования вида J_3 можно косвенно оценить равномерность использования ресурсов корпоративной ИС на интервале планирования.

Модель программного управления информационными потоками в корпоративной ИС представляется выражениями

$$\dot{x}_{ikj}^{(p,1)} = u_{ikj}^{(p,1)}(t), \quad \dot{x}_{v\mu\tilde{i}\rho}^{(p,2)} = u_{v\mu\tilde{i}\rho}^{(p,2)}(t); \quad 0 \leq u_{ikj}^{(p,1)}(t) \leq C_{ikj}^{(p,1)} u_{ikj}^{(o,1)}(t), \quad 0 \leq u_{v\mu\tilde{i}\rho}^{(p,2)}(t) \leq C_{v\mu\tilde{i}\rho}^{(p,2)} u_{v\mu\tilde{i}\rho}^{(o,2)}(t),$$

где переменная $x_{ikj}^{(p,1)}$ характеризует текущий объем информации, обработанной с использованием ресурса B_j ; переменная $x_{v\mu\tilde{i}\rho}^{(p,2)}$ характеризует объем информации типа ρ , переданной из ОЦОИ K_v в РЦОИ \tilde{K}_μ ; управляющие воздействия $u_{ikj}^{(p,1)}(t), u_{v\mu\tilde{i}\rho}^{(p,2)}(t)$ характеризуют соответственно интенсивности обработки информации в ОЦОИ и передачи ее в РЦОИ; константы $C_{ikj}^{(p,1)}, C_{v\mu\tilde{i}\rho}^{(p,2)}$ задают максимально возможное значение интенсивности обработки $u_{ikj}^{(p,1)}(t)$ и передачи $u_{v\mu\tilde{i}\rho}^{(p,2)}(t)$ информации.

Ограничения и краевые условия модели задаются выражениями

$$\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{S_i} u_{ikj}^{(p,1)} \leq R_j^{(p,1)} \quad \forall j = \overline{1, m}; \quad \sum_{\tilde{i}=1}^{\tilde{n}} \sum_{\rho=1}^{\Pi_i} \sum_{\mu=1}^{\tilde{\omega}} u_{\nu\mu\tilde{i}\rho}^{(p,2)} \leq R_{\nu}^{(p,1)} \quad \forall \nu = \overline{1, \omega};$$

$$\mathbf{h}_0^{(p)}(\mathbf{x}^{(p)}(t_0)) \leq \mathbf{0}, \quad \mathbf{h}_1^{(p)}(\mathbf{x}^{(p)}(t_f)) \leq \mathbf{0}.$$

Здесь величины $R_j^{(p,1)}$, $R_{\nu}^{(p,1)}$ задают максимальную интенсивность обработки информации на объекте B_j и максимальную пропускную способность каналов связи ОЦОИ; $\mathbf{h}_0^{(p)}$, $\mathbf{h}_1^{(p)}$ — известные дифференцируемые функции, задающие краевые условия.

Показатели качества программного управления информационными потоками определяются как

$$J_4 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left[\sum_{k=1}^{S_i} \left(a_{ik}^{(p,1)} - x_{ik}^{(p,1)}(t_f) \right)^2 + \sum_{\nu=1}^{\omega} \sum_{\mu=1}^{\tilde{\omega}} \sum_{\rho=1}^{\Pi_i} \left(a_{\nu\mu\tilde{i}\rho}^{(p,1)} - x_{\nu\mu\tilde{i}\rho}^{(p,1)}(t) \right)^2 \right],$$

$$J_5 = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{S_i} \sum_{j=1}^m \int_{t_0}^{t_f} \beta_{ik}^{(p,1)}(\tau) u_{ikj}^{(p,1)}(\tau) d\tau,$$

где $a_{ik}^{(p,1)}$, $a_{\nu\mu\tilde{i}\rho}^{(p,1)}$ — заданные величины, значения которых могут принять соответствующие переменные; с помощью гладкой функции времени $\beta_{ik}^{(p,1)}(\tau)$ в каждый момент τ задается уровень качества обработки информационного потока, возникающего при выполнении операции D_k^i .

Окончательно, используя все вышеперечисленные соотношения, можно построить следующую обобщенную динамическую модель программного управления корпоративной ИС:

$$M = \begin{cases} \mathbf{u}(t) \mid \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t); \\ \mathbf{h}_0(\mathbf{x}(t_0)) \leq \mathbf{0}, \mathbf{h}_1(\mathbf{x}(t_f)) \leq \mathbf{0}; \\ \mathbf{q}^{(1)}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \mathbf{0}, \mathbf{q}^{(2)}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \leq \mathbf{0}, \end{cases} \quad (1)$$

здесь $\mathbf{x} = (\mathbf{x}^{(o)T}, \mathbf{x}^{(k)T}, \mathbf{x}^{(p)T})^T$ — вектор состояния системы (1); $\mathbf{u} = (\mathbf{u}^{(o)T}, \mathbf{u}^{(k)T}, \mathbf{u}^{(p)T})^T$ — вектор управления системой (1); \mathbf{h}_0 , \mathbf{h}_1 — известные функции, задающие краевые условия в моменты $t = t_0, t = t_f$; $\mathbf{q}^{(1)}$, $\mathbf{q}^{(2)}$ — обобщенная запись ограничений, накладываемых на процесс функционирования корпоративной ИС.

Для окончательной формулировки обобщенной задачи планирования работы корпоративной ИС необходимо также ввести вектор показателей качества программного управления:

$$\mathbf{J} = (\mathbf{J}^{(o)T}, \mathbf{J}^{(k)T}, \mathbf{J}^{(p)T})^T.$$

В рамках предложенного подхода к формализации постановки задачи планирования работы корпоративной ИС она может интерпретироваться как задача программного управления соответствующим комплексом операций. В работах [1, 3] показано, как на этапе планирования с использованием модели (1) указанная задача может быть преобразована с помощью принципа максимума в краевую двухточечную задачу. При этом вместо исходного класса допустимых управлений $U = \left\{ \mathbf{u}(t) \mid u_{ikj}^{(o,1)}(t), u_{\nu\mu\tilde{i}\rho}^{(o,2)}(t), u_i^{(o,3)}(t) \in \{0, 1\}; \mathbf{q}^{(1)}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \mathbf{0}, \mathbf{q}^{(2)}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \leq \mathbf{0} \right\}$

предлагается рассматривать расширенный класс управлений $U_p = \left\{ \mathbf{u}(t) \mid u_{ikj}^{(o,1)}(t), u_{\nu\mu\tilde{\rho}}^{(o,2)}(t), u_i^{(o,3)}(t) \in [0, 1]; \mathbf{q}^{(1)}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \mathbf{0}, \mathbf{q}^{(2)}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \leq \mathbf{0} \right\}$.

Постановка задачи коррекции планов работы корпоративной ИС. Рассмотрим, как необходимо изменить описание обобщенной модели программного управления M (см. систему (1)) с тем, чтобы учесть в ней постоянно действующие ограниченные возмущения, возникающие на этапе реализации плана. Будем считать, что при функционировании корпоративной ИС в некоторые моменты времени $t_\sigma \in [t_0, t_f)$ в координирующий орган этой системы поступает информация о ее текущем состоянии (состоянии системы (1)) в виде вектора состояния \mathbf{x}_σ .

В этом случае задача коррекции планов работы корпоративной ИС состоит в следующем: в процессе реализации плана работы ИС на интервале $[t_0, t_f)$ найти новое программное управление $\mathbf{u}_k(t)$ (на основе коррекции $\mathbf{u}(t) = \mathbf{u}_{pr}(t)$), которое удовлетворяет ограничениям и краевым условиям модели (1), и при этом показатель качества реализации плана вида

$$\tilde{J} = \int_{t_0}^{t_f} |\mathbf{x}(t) - \mathbf{x}_{pr}(t)| dt \rightarrow \min$$

принимает минимальные значения. При этом пусть

$\mathbf{u}_{pr}(t), \mathbf{x}_{pr}(t)$ — соответственно программное управление корпоративной ИС и ее текущее состояние, рассчитанные на этапе планирования.

Введем в рассмотрение вектор отклонений $\mathbf{y}(t)$ фактической „траектории движения“ $\mathbf{x}(t)$ динамической системы (1) от планируемой траектории (плана) $\mathbf{x}_{pr}(t)$ и вектор управлений $\mathbf{w}(t)$, который определяется из выражения $\mathbf{u}_k(t) = \mathbf{u}(t) + \mathbf{w}(t)$ и удовлетворяет следующему условию:

$$w_{ikj}^{(o,1)}(t) = \begin{cases} 1, & \text{если в исходном плане } u_{ikj\ pr}^{(o,1)}(t) = 0, \\ & \text{а при коррекции плана требуется выполнить операцию } D_{ikj}^i \\ & \text{с использованием ресурса } B_j; \\ -1, & \text{если в исходном плане } u_{ikj\ pr}^{(o,1)}(t) = 1 \text{ и при коррекции плана} \\ & \text{данное управляющее воздействие следует отменить;} \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

Аналогичным образом определим $w_{\nu\mu\tilde{\rho}}^{(o,2)}(t)$ и $w_i^{(o,3)}(t)$, а ограничения на управляющие воздействия $w_{ikj}^{(p,1)}(t)$ и $w_{\nu\mu\tilde{\rho}}^{(p,2)}(t)$ будут описаны далее.

При решении задачи коррекции плана корпоративной ИС будем искать функции $w_{ikj}^{(o,1)}(t), w_{\nu\mu\tilde{\rho}}^{(o,2)}(t), w_i^{(o,3)}(t)$, как и на этапе планирования, в расширенном классе допустимых управлений:

$$\bar{U}_p = \left\{ \mathbf{w}(t) \mid w_{ikj}^{(o,1)}(t), w_{\nu\mu\tilde{\rho}}^{(o,2)}(t), w_i^{(o,3)}(t) \in [-1, 1]; \mathbf{q}^{(1)}(\mathbf{y}, \mathbf{u}_k) = \mathbf{0}, \mathbf{q}^{(2)}(\mathbf{y}, \mathbf{u}_k) \leq \mathbf{0} \right\}.$$

При использовании в модели (1) сформированного по определенному правилу управления $\mathbf{u}_k(t)$ получим новую модель управления \tilde{M} , которая с формальной точки зрения является линейной конечномерной нестационарной динамической системой (ДС). Она содержит нелинейные логические ограничения, задаваемые в виде равенств и неравенств, а также имеет нелинейные показатели качества.

Применение метода позиционной оптимизации. Для коррекции плана работы корпоративной ИС, задаваемого с помощью величин $\mathbf{u}_{pr}(t)$, $\mathbf{x}_{pr}(t)$, предлагается использовать конструктивные методы теории оптимального управления. Так, применяя метод позиционной оптимизации [6—8], корректирующее управление в текущий момент времени будем искать как позиционное решение вспомогательной задачи оптимального управления.

Рассмотрим интервал времени, на котором была ранее решена задача программного управления: $[t_0, t_f)$, $t_0 < t_f < +\infty$. Зададим шаг дискретности $h = (t_f - t_0)/L$, где L — целое число. Определим функцию $\mathbf{w}(t)$, $t \in [t_0, t_f)$, как дискретное управление $\mathbf{w}(t) = \mathbf{w}(t_0 + lh)$ при $t \in [t_0 + lh, t_0 + (l+1)h)$, $l = \overline{0, L-1}$. В этом классе дискретных управлений будем определять $\mathbf{w}(t)$, применяя метод позиционной оптимизации. Рассмотрим в момент времени $\tau = t_\sigma$ задачу оптимального управления для сформированной ранее модели \tilde{M} . Обозначим: $\mathbf{w}(\tau | \tau, \mathbf{z})$ — оптимальное программное управление для позиции (τ, \mathbf{z}) (позиционное решение) и назовем его оптимальным управлением вспомогательной задачи; $Y(\tau)$ — множество всех возможных начальных состояний $\mathbf{z} = \mathbf{y}(\tau)$, для которых эта задача имеет решение при фиксированном τ , $\mathbf{z} = \mathbf{y}(\tau)$, $\mathbf{y}(\tau) \in Y(\tau)$, $t \in T(\tau) = [\tau, t_f)$.

Рассматриваемая задача относится к классу задач управления нелинейными динамическими системами вследствие того, что в предлагаемой модели \tilde{M} , как и в модели M , присутствуют нелинейные ограничения. Поэтому на этапе реализации плана работы корпоративной ИС введем агрегированные операции $D^i = \bigcup_{k=1}^{S_i} D_k^i$, для которых отсутствует необходимость учитывать нелинейные логические ограничения. Тогда в момент времени τ вспомогательная задача оптимального управления агрегированной ДС имеет вид

$$\left. \begin{aligned} \sum_{k=1}^{S_i} \dot{y}_{ik}^{(o,1)} &= \sum_{k=1}^{S_i} \sum_{j=1}^m \varepsilon_{ij}(t) \theta_{ikj} w_{ikj}^{(o,1)}(t), \quad \dot{y}_{\nu\mu\tilde{i}\tilde{\rho}}^{(o,2)} = w_{\nu\mu\tilde{i}\tilde{\rho}}^{(o,2)}(t), \quad \dot{y}_i^{(o,3)} = w_i^{(o,3)}(t), \quad \dot{y}_j^{(k)} = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{S_i} \theta_{ikj} w_{ikj}^{(o,1)}(t), \\ \dot{y}_{ikj}^{(p,1)} &= w_{ikj}^{(p,1)}(t), \quad \dot{y}_{\nu\mu\tilde{i}\tilde{\rho}}^{(p,2)} = w_{\nu\mu\tilde{i}\tilde{\rho}}^{(p,2)}(t), \quad i = \overline{1, n}, \quad \tilde{i} = \overline{1, \tilde{n}}, \quad j = \overline{1, m}, \quad \nu = \overline{1, \omega}, \quad \mu = \overline{1, \tilde{\omega}}, \end{aligned} \right\} (2)$$

с ограничениями на управляющие воздействия $\mathbf{w}(t)$:

$$\begin{aligned} -\sum_{j=1}^m u_{ikj\ pr}^{(o,1)} &\leq \sum_{j=1}^m w_{ikj}^{(o,1)} \leq 1 - \sum_{j=1}^m u_{ikj\ pr}^{(o,1)} \quad \forall i = \overline{1, n}, \quad \forall k = \overline{1, S_i}; \\ -\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{S_i} u_{ikj\ pr}^{(o,1)} &\leq \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{S_i} w_{ikj}^{(o,1)} \leq R_j^{(o,1)} - \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{S_i} u_{ikj\ pr}^{(o,1)} \quad \forall j = \overline{1, m}; \\ -\sum_{\tilde{i}=1}^{\tilde{n}} \sum_{\rho=1}^{\tilde{\omega}} \sum_{\mu=1}^{\tilde{\omega}} u_{\nu\mu\tilde{i}\tilde{\rho}\ pr}^{(o,2)} &\leq \sum_{\tilde{i}=1}^{\tilde{n}} \sum_{\rho=1}^{\tilde{\omega}} \sum_{\mu=1}^{\tilde{\omega}} w_{\nu\mu\tilde{i}\tilde{\rho}\ pr}^{(o,2)} \leq R_\nu^{(o,1)} - \sum_{\tilde{i}=1}^{\tilde{n}} \sum_{\rho=1}^{\tilde{\omega}} \sum_{\mu=1}^{\tilde{\omega}} u_{\nu\mu\tilde{i}\tilde{\rho}\ pr}^{(o,2)} \quad \forall \nu = \overline{1, \omega}; \\ -u_{ikj\ pr}^{(p,1)}(t) &\leq w_{ikj}^{(p,1)}(t), \quad w_{ikj}^{(p,1)}(t) - C_{ikj}^{(p,1)} w_{ikj}^{(o,1)}(t) \leq C_{ikj}^{(p,1)} u_{ikj\ pr}^{(o,1)}(t) - u_{ikj\ pr}^{(p,1)}(t); \\ -u_{\nu\mu\tilde{i}\tilde{\rho}\ pr}^{(p,2)}(t) &\leq w_{\nu\mu\tilde{i}\tilde{\rho}\ pr}^{(p,2)}(t), \quad w_{\nu\mu\tilde{i}\tilde{\rho}\ pr}^{(p,2)}(t) - C_{\nu\mu\tilde{i}\tilde{\rho}\ pr}^{(p,2)} w_{\nu\mu\tilde{i}\tilde{\rho}\ pr}^{(o,2)}(t) \leq C_{\nu\mu\tilde{i}\tilde{\rho}\ pr}^{(p,2)} u_{\nu\mu\tilde{i}\tilde{\rho}\ pr}^{(o,2)}(t) - u_{\nu\mu\tilde{i}\tilde{\rho}\ pr}^{(p,2)}(t); \\ -\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{S_i} u_{ikj\ pr}^{(p,1)} &\leq \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{S_i} w_{ikj}^{(p,1)} \leq R_j^{(p,1)} - \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{S_i} u_{ikj\ pr}^{(p,1)} \quad \forall j = \overline{1, m}; \\ -\sum_{\tilde{i}=1}^{\tilde{n}} \sum_{\rho=1}^{\tilde{\omega}} \sum_{\mu=1}^{\tilde{\omega}} u_{\nu\mu\tilde{i}\tilde{\rho}\ pr}^{(p,2)} &\leq \sum_{\tilde{i}=1}^{\tilde{n}} \sum_{\rho=1}^{\tilde{\omega}} \sum_{\mu=1}^{\tilde{\omega}} w_{\nu\mu\tilde{i}\tilde{\rho}\ pr}^{(p,2)} \leq R_\nu^{(p,1)} - \sum_{\tilde{i}=1}^{\tilde{n}} \sum_{\rho=1}^{\tilde{\omega}} \sum_{\mu=1}^{\tilde{\omega}} u_{\nu\mu\tilde{i}\tilde{\rho}\ pr}^{(p,2)} \quad \forall \nu = \overline{1, \omega}. \end{aligned}$$

При этом краевые условия и показатель качества во вспомогательной задаче имеют соответственно следующий вид: $\mathbf{y}(\tau) = \mathbf{y}_\tau$, $\mathbf{y}(t_f) = \mathbf{0}$ и $\hat{J}_\tau(z) = \min_{\tau} \int_{\tau}^{t_f} |\mathbf{y}(t)| dt$. Тогда значения управления $\mathbf{w}(t)$ будем определять последовательно, решая в каждый момент времени $\tau = t_\sigma$ вспомогательные задачи с новыми начальными условиями $\mathbf{y}(\tau = t_\sigma) = \mathbf{y}_\sigma$. При этом с формальной точки зрения динамически формируемые вспомогательные задачи относятся к классу задач оптимального управления с интервальными ограничениями. В работе [6] показано, что в классе дискретных управлений они могут быть преобразованы в задачи линейного программирования с матрицей „ленточной“ структуры, для решения которых разработаны адаптивные методы.

Заключение. Основное достоинство и перспективность предложенного в статье подхода состоит в том, что применительно к АПО продемонстрирована возможность конструктивного использования результатов современной теории оптимального управления.

Исследования по рассматриваемой тематике проводились при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 10-07-00311, 10-08-90027, 09-07-00066, 08-08-00403, 09-07-11004), Отделения нанотехнологий и информационных технологий РАН (проект № 2.3).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иконникова А. В., Петрова И. А., Потрясаев С. А., Соколов Б. В. Динамическая модель комплексного планирования модернизации и функционирования информационной системы // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 11. С. 62—69.
2. Охтилев М. Ю., Соколов Б. В. Юсупов Р. М. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006. 410 с.
3. Потрясаев С. А. Динамическая модель и алгоритмы комплексного планирования операций и распределения ресурсов в корпоративной информационной системе: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб, 2009. 159 с.
4. Калинин В. Н. О теории управления активными подвижными объектами // Изв. вузов СССР. Приборостроение. 1981. Т. 24, № 6. С. 26—31.
5. Калинин В. Н., Соколов Б. В. Многомодельное описание процессов управления космическими средствами // Теория и системы управления. 1995. № 1. С. 149—156.
6. Балашевич Н. В., Габасов Р. Ф., Кириллова Ф. М. Численные методы программной и позиционной оптимизации линейных систем управления // Журн. вычисл. математики и мат. физики. 2000. Т. 40, № 6. С. 838—859.
7. Габасов Р. Ф., Кириллова Ф. М., Ружижская Е. А. Демпфирование и стабилизация маятника при больших начальных возмущениях // Изв. РАН. Сер. Теория и системы управления. 2001. № 6. С. 29—38.
8. Габасов Р. Ф., Ружижская Е. А. Стабилизация систем с обеспечением дополнительных свойств переходных процессов // Кибернетика и системный анализ. 2001. № 3. С. 139—151.

Сведения об авторах

- Инна Владимировна Соловьева** — СПИИРАН, лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании; мл. науч. сотрудник
E-mail: isolovyeva@mail.ru
- Олег Игнатьевич Семенков** — канд. техн. наук; Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси, Минск
- Борис Владимирович Соколов** — д-р техн. наук, профессор; СПИИРАН; зам. директора по научным вопросам; E-mail: sokol@iias.spb.su

Рекомендована СПИИРАН

Поступила в редакцию
09.07.10 г.