

А.Н. ПАВЛОВ
**КОМПЛЕКСНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ РЕКОНФИГУРАЦИИ
СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ**

Павлов А.Н. Комплексное моделирование структурно-функциональной реконфигурации сложных объектов.

Аннотация. Особую актуальность приобретает постановка и решение различных классов задач планирования структурной динамики сложных объектов (СЛО). В данной статье на основе обобщенной теоретико-множественной постановки задачи планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО рассматривается комплекс моделей планирования и управления процессами обработки и передачи материальных и/или информационных ресурсов на перестраиваемой структуре, а также модель параметрического синтеза облика СЛО, обеспечивающего робастность планов его реконфигурации в рамках оптимистического и пессимистического сценариев развития структурной динамики СЛО.

Ключевые слова: сложный объект, многокритериальные модели анализа и синтеза структурно-функциональной реконфигурации.

Pavlov A.N. Integrated modelling of the structural and functional reconfiguration of complex objects.

Abstract. Particularly urgent formulation and solution of various classes of scheduling problems of structural dynamics of complex objects (CO). This article is based on a generalized set-theoretic formulation of the problem of planning the structural-functional reconfiguration of the CO is considered a complex model of planning and management of the processing and transfer of material and / or information resources to restructure, and a model of parametric synthesis image of the CO, providing the robustness of its reconfiguration plans under the optimistic and pessimistic scenarios for the structural dynamics of the CO.

Keywords: complex object, multicriteria models for analysis and synthesis of structural and functional reconfiguration.

1. Введение. Технология функциональной реконфигурации (гибкого перераспределения выполняемых системой целей, задач и функций между работоспособными, частично работоспособными компонентами) среди способов обеспечения живучести и устойчивости сложных объектов (СЛО) занимает одно из первостепенных значений.

В процессе исследования применения указанной технологии для многофункциональных взаимосвязанных систем реального времени выделяют, как правило, два характерных класса заданий, выполняемых СЛО [1-5]. Один из них представляет множество задач, для которых не задана в явном виде временная упорядоченность их выполнения, т.е. регламентированные (периодические) задачи или случайные потоки задач. Задание второго класса является множеством задач частично

упорядоченных по выполнению во времени, включая возможность параллельного выполнения определенных задач.

Для заданий первого класса в основе методов построения механизма обеспечения живучести и устойчивости [2, 3, 5] лежит идея функционального резервирования.

Для заданий второго класса в основе методов лежат формальные модели параллельных вычислений типа временных стохастических сетей Петри или так называемая CSP-концепция (концепция взаимодействующих последовательных процессов), разработанная Ч.Хоаром, и осуществляется построение отказоустойчивых расписаний выполнения задач для множества работоспособных состояний СЛО [6].

Однако следует отметить, что предлагаемые подходы к решению задачи функциональной реконфигурации СЛО в условиях перестраиваемой структуры относятся к стандартной технологии реконфигурации («слепой» реконфигурации) СЛО.

Данные подходы не приемлемы для сложных технологических процессов, где необходимо учитывать текущие характеристики решаемых в СЛО задач и выполняемых функций; анализировать и оценивать текущее состояние СЛО в целом; осуществлять оперативный расчёт, оценивание и анализ целевых и информационно-технических возможностей СЛО для обоснованного перераспределения функций СЛО между её работоспособными элементами и подсистемами. Следовательно, применительно к современным СЛО реконфигурацию следует рассматривать не только как технологию управления структурами СЛО для компенсации отказов, но и как технологию управления, направленную на повышение эффективности функционирования СЛО. В рамках теории управления структурной динамикой СЛО предлагается данную реконфигурацию называть структурно-функциональной реконфигурацией. При этом особую актуальность приобретает постановка и решение различных классов задач управления структурной динамикой СЛО, в том числе и задач планирования и управления процессами обработки и передачи ресурсов на перестраиваемой структуре.

2. Теоретико-множественная постановка задачи. В работе [9] сформулированы и обоснованы общие и частные требования, предъявляемые к разработке новых, специальных принципов, моделей, методов и методик многокритериального оценивания, анализа и выбора структурно-функциональной реконфигурации СЛО для повышения обоснованности и устойчивости управления СЛО.

При этом проблема планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО на этапе его применения по целевому назначе-

нию предполагает формулировку и решение трёх основных классов задач.

Задачи класса А – задачи построения сценариев (траекторий) структурной реконфигурации СЛО при деструктивных воздействиях по критическим функциональным элементам (ФЭ) объекта.

Задачи класса В – задачи разработки, анализа и многокритериального синтеза планов структурно-функциональной реконфигурации СЛО в динамически изменяющейся обстановке.

Задачи класса С (вспомогательные задачи): исследования монотонных-немонотонных, однородных-неоднородных СЛО на основе концепции генома структурного построения объекта; оценки показателей критичности отказов ФЭ СЛО (структурно-топологических, структурно-функциональных); многокритериального анализа критичности отказов ФЭ СЛО с учетом количественных и качественных показателей; построения классов эквивалентных сценариев структурной реконфигурации СЛО, выделения эталонных сценариев структурной реконфигурации СЛО; разработки планов структурно-функциональной реконфигурации СЛО; параметрический синтез структуры СЛО, обеспечивающей робастность процессов планирования структурно-функциональной реконфигурации; аналитико-имитационного моделирования условий реализации планов структурно-функциональной реконфигурации СЛО.

Ранее [9, 10] подробно рассмотрены основные подходы к решению **задач класса А** и ряда вспомогательных **задач класса С**. В результате решения данных задач построено множество эталонных сценариев структурной реконфигурации СЛО $S^{\text{Эталон}} = \{S_{C_1}^{\text{Эталон}}, \dots, S_{C_\chi}^{\text{Эталон}}\}$, включающее в свой состав оптимистическую и пессимистическую эталонную траекторию.

Остановимся в данной работе более подробно на постановке и методах (алгоритмах решения) **задач класса В**, а также **задачи параметрического синтеза структуры СЛО**, обеспечивающей робастность процессов планирования структурно-функциональной реконфигурации.

Произвольный СЛО будем рассматривать как множество $A = \{A_i, i = 1, 2, \dots, n\}$ ФЭ, взаимодействующих посредством некоторой инфраструктуры и представляющие собой искусственно созданные материальные объекты, осуществляющие информационное и/или вещественное взаимодействие с другими ФЭ, в ходе которого образуются соответствующие потоки между элементами и подсистемами СЛО.

Каждый из образованных потоков характеризуется текущим и требуемым объёмом (уровнем), интенсивностью передачи (приёма), скоростью изменения уровня потока, качественными параметрами потока.

Так же будем предполагать, что каждый ФЭ СЛО (узел, подсистема СЛО) оборудован унифицированной многофункциональной аппаратурой, предназначенной для хранения, передачи и обработки потоков, известны технические характеристики указанной аппаратуры.

Удобно описывать процессы функционирования ФЭ, базируясь на диаграммах обобщенных состояний и диаграммах переходов из обобщенных состояний ФЭ СЛО. Так на рисунке 1 изображён фрагмент диаграммы переходов из обобщённых состояний A_{μ} ФЭ СЛО. На данном рисунке приняты следующие условные обозначения: 1 – приём необработанного потока ФЭ A_{μ} от ФЭ $A_v \in A_0$; 2 – приём необработанного потока ФЭ A_{μ} от ФЭ $A_v \in A_p$; 3 – приём обработанного потока ФЭ A_{μ} от ФЭ $A_v \in A_p$; 4 – хранение поступившего на ФЭ A_{μ} потока; 5 – обработка потока, поступившего на ФЭ A_{μ} ; 6 – передача необработанного потока с ФЭ A_{μ} на ФЭ $A_v \in A_p$; 7 – передача обработанного потока с ФЭ A_{μ} на ФЭ $A_v \in A_p$; 8 – передача обработанного потока с ФЭ A_{μ} на ФЭ $A_v \in A_{\pi}$.

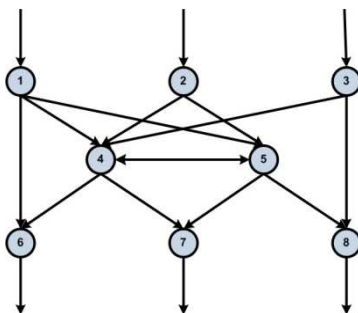


Рис. 1. Фрагмент диаграммы переходов из обобщённых состояний ФЭ СЛО.

Каждая эталонная траектория $Sc_{\chi}^{\text{Эталон}} \in Sc^{\text{Эталон}}$ характеризуется набором структурных состояний СЛО $Sc_{\chi}^{\text{Эталон}} = \{St_{i_1, i_2, \dots, i_k}^{\chi}\}$, смену которых СЛО осуществляет на промежутке времени $T = (t_0, t_f]$ в результа-

те ее реконфигурации. В соответствии с содержательным и теоретико-множественным описанием решаемой в работе проблемы для формализации указанного динамического изменения структурного состояния введем в рассмотрение динамический взвешенный мультиграф (ДВМ) следующего вида:

$$G_{\chi}(t) = \langle X_{\chi}(t), E_{\chi}(t), W_{\chi}(t) \rangle, \quad (1)$$

где χ — индекс, характеризующий номер эталонной траектории структурной реконфигурации СЛО; $X_{\chi}(t) = \{A_{xi}(t), i \in N_{\chi}\}$ — множество ФЭ, входящих в состав структуры $G_{\chi}(t)$ (множество вершин) в момент времени t ; $E_{\chi}(t) = \{e_{xij}(t) \in \{0,1\}, i, j \in N_{\chi}\}$ — множество дуг ДВМ, отражающих взаимосвязи между его ФЭ в момент времени t ; $W_{\chi}(t) = \{w_{\chi ip}(t), i, j \in N_{\chi}, \rho \in P\}$ — множество значений параметров, количественно характеризующих взаимосвязь соответствующих ФЭ ДВМ (при условии $i \neq j$) и сами ФЭ ДВМ (при условии $i = j$).

При этом матричная временная функция $e_{xij}(t)$, задающая пространственно–временные ограничения и технические возможности, связанные с передачей потока между ФЭ A_{xi} и A_{xj} . Данная функция принимает значение 1, если имеется возможность передачи потока, 0 – в противном случае.

Необходимо подчеркнуть, что в реально функционирующих СЛО потребители обмениваются между собой разнородными ресурсами типа $\rho \in P = \{1, 2, \dots, p\}$, имеющей различную степень важности и срочности.

В качестве элементов множества $W_{\chi}(t) = \{w_{\chi ip}(t), i, j \in N_{\chi}, \rho \in P\}$, описывающих особенности передачи и обработки ресурсов различного типа, могут быть использованы следующие функции ($w_{\chi ip}(t) \in \{V_{\chi ip}(t), \psi_{\chi ip}(t), \omega_{\chi ip}(t), \phi_{\chi ip}(t)\}$):

$V_{\chi ip}(t)$ — объём хранилища ресурса ρ типа в A_{xi} ФЭ СЛО; $\psi_{\chi ip}(t)$ — интенсивность поступления внешнего ресурса ρ типа в A_{xi} ФЭ СЛО; $\omega_{\chi ip}(t)$ — скорость передачи ресурса ρ типа между ФЭ A_{xi} , A_{xj} системы; $\phi_{\chi ip}(t)$ — интенсивность переработки ресурса ρ типа в A_{xi} ФЭ системы.

Для конструктивного решения задачи планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО необходимо: во-первых, разра-

ботать формальное описание различных аспектов процесса структурно-функциональной реконфигурации СЛО, и, во-вторых, разработать соответствующие методы, алгоритмы и методики решения исследуемых в данной работе задач планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО.

Проведем обобщенную постановку задачи планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО, для чего воспользуемся теоретико-множественным подходом, предложенным в работах [11-14].

Так теоретико-множественная модель структурно-функциональной реконфигурации СЛО в обобщенном виде может быть представлена в виде математической структуры выбора с мультипредпочтением [12, 15]:

$$\left(Q(s, \omega), \Delta, \{r_i^\alpha(\omega)\}_{i \in \Gamma}, \{r_j^\beta(\omega)\}_{j \in \Gamma_1}, \{F^k(\omega)\}_{k \in \Gamma_2}, \Omega = \{\omega\} \right), \quad (2)$$

где

- $Q(s, \omega)$ — некоторая исходная структура типа s , которая определяет тип модели (статическая, динамическая, математическая, логико-алгебраическая, детерминированная, с неопределенностью и т.п.);
- Δ — множество альтернатив (планов, решений), на котором непосредственно производится выбор;
- $\{r_j^\beta(\omega)\}_{j \in \Gamma_1}$ — множество отношений, ограничивающих выбор, вводимых непосредственно при постановке задач выбора и отражающих основные пространственно-временные, технические и технологические ограничения, связанные с процессом функционирования рассматриваемой СЛО;
- $\{r_i^\alpha(\omega)\}_{i \in \Gamma}$ — отношения предпочтения, задаваемые на $\Delta \times \Omega$ и характеризующие различные предпочтения при выборе рационального решения (для задач структурно-функциональной реконфигурации СЛО такие отношения задаются с использованием структурно-функциональных показателей);
- $\{F^k(\omega)\}_{k \in \Gamma_2}$ — множества согласующих правил, позволяющих задавать результирующее отношение предпочтения задачи структурно-функциональной реконфигурации СЛО;
- $\Omega = \{\omega\}$ — множество неопределенности.

Структура (2) представляет широкие возможности для того, чтобы в ее рамках рассматривать разнообразные математические постановки задач структурно-функциональной реконфигурации СлО. Введение структуры $Q(s, \omega)$ позволяет ставить задачи выбора, связанные с теми или иными структурными (модельными) ограничениями, задаваемыми посредством сетей (статические модели), моделей типа динамических систем и т.д. Ограничивающие отношения $\{r_j^\beta(\omega)\}_{j \in \Gamma_1}$ часто представляют в виде равенств и неравенств (случай смешанных ограничений), что позволяет связать постановку отдельных задач структурно-функциональной реконфигурации СлО с соответствующими детерминированными задачами математического программирования и оптимального управления.

Характерной особенностью структуры (2), отличающей ее от соответствующей структуры выбора в условиях полной определенности, является наличие множества неопределенности $\Omega = \{\omega\}$, от элементов которого зависят все или часть компонент структуры (2). Следует различать четыре основных варианта введения неопределенности в описании исходной структуры $Q(s, \omega)$, что приводит к рассмотрению постановок задач выбора соответственно на вероятностных, статистических, нечетких структурах, а также структурах с неизвестностью.

При постановке задач выбора на вероятностных и нечетких структурах вводится $(\Omega, \mathfrak{F}, G)$ — вероятностное или нечеткое пространство, определяемое заданием множества элементарных событий $\Omega = \{\omega\}$, \mathfrak{F} — σ -алгебры и соответственно вероятностной или нечеткой меры G .

Кроме того особенностью структуры (2) является использование в явном или неявном виде согласующего правила $F(\omega)$ или множества согласующих правил $\{F^k(\omega)\}_{k \in \Gamma_2}$, направленных на преодоление критериальной неопределенности и разрешения противоречия между исходными отношениями предпочтения. Вводимое согласующее правило вида $F^k(\omega)$ определяет результирующее отношение предпочтения $r_{\text{рез}}(\omega) = F^k(\{r_i^\alpha(\omega), i \in \Gamma\})$.

С учётом вышесказанного, задача структурно-функциональной реконфигурации СлО сводится к задаче определения множества наилучших с точки зрения заданных отношений предпочтения альтер-

натив. В сложных ситуациях выбора с множественным предпочтением первым шагом решения является выделение множества недоминируемых альтернатив $\Delta_{\beta}^*(\omega)$, т.е. множества Парето, определяемого следующим образом [12, 15]:

$$\Delta_{\beta}^*(\omega) = \{u \in \Delta_{\beta}(\omega) \mid (\nexists z \in \Delta_{\beta}(\omega))(z r_{\text{рез}}(\omega) u)\}. \quad (3)$$

Здесь множество $\Delta_{\beta}(\omega) \subseteq \Delta$ допустимых альтернатив, удовлетворяющих отношениям $\{r_j^{\beta}(\omega)\}_{j \in \Gamma_1}$, ограничивающих выбор.

При этом в целях упрощения дальнейшего рассмотрения конкретных задач структурно-функциональной реконфигурации СЛО будем пользоваться часто вводимым предположением о том, что задание отношений предпочтения $\{r_i^{\alpha}(\omega)\}_{i \in \Gamma}$ и ограничивающих отношений $\{r_j^{\beta}(\omega)\}_{j \in \Gamma_1}$ может быть осуществлено с помощью некоторого числа отображений φ_i , ($i = 1, \dots$), где каждое φ_i есть отображение вида: $\varphi_i : \Delta \times \Omega \rightarrow \mathfrak{R}^1$, принимающее соответственно при $u \in \Delta$ и $\omega \in \Omega$ значение $\varphi_i(u, \omega)$.

Итак, с использованием представленной выше теоретико-множественной модели функционирования СЛО удалось формализовать концептуальную модель планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО и классифицировать её как структуру выбора со многими отношениями предпочтения в условиях неопределенности.

3. Динамическая модель. Из содержательной постановки задачи планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО следует, что динамику изменения количества ресурса ρ типа, проходящей через A_{χ_i} ФЭ СЛО можно описать следующим соотношением

$$\dot{x}_{\chi_i \rho}^+(t) = \dot{x}_{\chi_i \rho}^-(t) + \dot{y}_{\chi_i \rho}(t) + \dot{z}_{\chi_i \rho}(t), \quad i \in N_{\chi} = \{1, 2, \dots, n_{\chi}\}. \quad (4)$$

В данном выражении (4) через $\dot{x}_{\chi_i \rho}^+(t)$ обозначена интенсивность поступления ресурса ρ типа в A_{χ_i} ФЭ СЛО, $\dot{x}_{\chi_i \rho}^-(t)$ — интенсивность сокращения ресурса ρ типа в A_{χ_i} ФЭ, $\dot{y}_{\chi_i \rho}(t)$ — интенсивность накопления (передачи) ресурса ρ типа в запоминающем устройстве A_{χ_i} ФЭ СЛО, $\dot{z}_{\chi_i \rho}(t)$ — скорость потери ресурса ρ типа в A_{χ_i} ФЭ.

В соответствии с обозначениями, введенными в содержательной постановке задачи, интенсивность поступления ресурса ρ типа в A_{χ_i} ФЭ СЛО можно описать следующим соотношением (5):

$$\dot{x}_{\chi_{ip}}^+(t) = \Psi_{\chi_{ip}}(t) + \sum_{j=1}^{n_{\chi}} e_{\chi_{ij}}(t) \cdot \omega_{\chi_{ij\rho}}(t) \cdot u_{\chi_{ij\rho}}(t), \quad i \in N_{\chi}, \quad (5)$$

где $u_{\chi_{ij\rho}}(t) \in \{0,1\}$ — управление передачей ресурса ρ типа на эталонной траектории $Sc_{\chi}^{\text{Эталон}}$ изменения структурных состояний СЛО. При этом если $u_{\chi_{ij\rho}}(t) = 1$, то ресурс ρ типа передается из A_{χ_j} ФЭ в A_{χ_i} , а если $u_{\chi_{ij\rho}}(t) = 0$ тогда ресурс не передается.

Интенсивность же сокращения ресурса ρ типа в A_{χ_i} ФЭ СЛО можно описать соотношением (6)

$$\dot{x}_{\chi_{ip}}^-(t) = \Phi_{\chi_{ip}}(t) \cdot \vartheta_{\chi_{ip}}(t) + \sum_{j=1}^{n_{\chi}} e_{\chi_{ij}}(t) \cdot \omega_{\chi_{ij\rho}}(t) \cdot u_{\chi_{ij\rho}}(t), \quad i \in N_{\chi}, \quad (6)$$

где $\vartheta_{\chi_{ip}}(t) \in \{0,1\}$ — управление обработкой ресурса ρ типа на эталонной траектории $Sc_{\chi}^{\text{Эталон}}$ изменения структурных состояний СЛО. Здесь если $\vartheta_{\chi_{ip}}(t) = 1$, то ресурс ρ типа обрабатывается в A_{χ_i} ФЭ, а если $\vartheta_{\chi_{ip}}(t) = 0$, то ресурс не обрабатывается.

Соотношения (4)–(6) описывают динамику передачи, обработки, сохранения и потери ресурса на эталонной траектории $Sc_{\chi}^{\text{Эталон}}$ изменения структурных состояний СЛО. Следует отметить, что $\Psi_{\chi_{ip}}(t)$, $\omega_{\chi_{ij\rho}}(t)$, $\Phi_{\chi_{ip}}(t)$ являются заданными функциями, $e_{\chi_{ij}}(t)$ описывает структурную реконфигурацию СЛО по соответствующему сценарию $Sc_{\chi}^{\text{Эталон}}$ на интервале управления $T = (t_0, t_f]$.

Функции $y_{\chi_{ip}}(t)$, $z_{\chi_{ip}}(t)$, $u_{\chi_{ij\rho}}(t)$, $\vartheta_{\chi_{ip}}(t)$ являются неизвестными, причем управления $u_{\chi_{ij\rho}}(t)$, $\vartheta_{\chi_{ip}}(t)$ однозначно определяют потери $z_{\chi_{ip}}(t)$ и динамику накопления и передачи ресурса $y_{\chi_{ip}}(t)$ из запоминающего устройства A_{χ_i} ФЭ СЛО. Следовательно, пару функций $y_{\chi_{ip}}(t)$, $z_{\chi_{ip}}(t)$ можно рассматривать как состояние динамической системы.

В этих условиях модель планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО будет включать в себя следующие основные элементы.

Модель процесса структурно-функциональной реконфигурации СЛО задается соотношениями (4)–(6).

Ограничения на возможные программные управления и состояния можно описать следующим образом

$$0 \leq \sum_{\rho=1}^p y_{\chi i \rho}(t) \leq V_{\chi i} \quad \forall i \in N_{\chi}, t \in (t_0, t_f], \quad (7)$$

$$u_{\chi i \rho}(t) \in \{0, 1\}, \quad \vartheta_{\chi i \rho}(t) \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in N_{\chi}, \rho \in P, t \in (t_0, t_f], \quad (8)$$

$$z_{\chi i \rho}(t) \geq 0, \quad \dot{z}_{\chi i \rho}(t) \geq 0 \quad \forall i \in N_{\chi}, \rho \in P, t \in (t_0, t_f]. \quad (9)$$

Краевые условия имеют вид:

$$y_{\chi i \rho}(t_0) = z_{\chi i \rho}(t_0) = 0 \quad \forall i \in N_{\chi}, \quad y_{\chi i \rho}(t_f) \geq 0, \quad z_{\chi i \rho}(t_f) \geq 0 \quad \forall i \in N_{\chi}. \quad (10)$$

Допустимые управления $u_{\chi i \rho}(t), \vartheta_{\chi i \rho}(t)$, которые удовлетворяют уравнениям (4)–(6), описывающим изменение состояния, ограничениям вдоль траектории (7)–(9) и краевым условиям (10), могут оцениваться в соответствии с различными показателями, характеризующими качество функционирования СЛО.

Таковыми показателя могут быть:

➤ суммарные потери ресурса

$$J_{\chi 1} = \int_{t_0}^{t_f} \sum_{\rho=1}^p \sum_{i=1}^{n_{\chi}} z_{\chi i \rho}(t) dt; \quad (11)$$

➤ суммарный объем обработанного ресурса

$$J_{\chi 2} = \int_{t_0}^{t_f} \sum_{\rho=1}^p \sum_{i=1}^{n_{\chi}} \Phi_{\chi i \rho}(t) \cdot \vartheta_{\chi i \rho}(t) dt; \quad (12)$$

➤ суммарный объем сохраненного ресурса

$$J_{\chi 3} = \int_{t_0}^{t_f} \sum_{\rho=1}^p \sum_{i=1}^{n_{\chi}} y_{\chi i \rho}(t) dt; \quad (13)$$

➤ издержки на передачу и обработку ресурса

$$J_{\chi 4} = \int_{t_0}^{t_f} \left(\sum_{\rho=1}^p \sum_{i=1}^{n_{\chi}} \sum_{j=1}^{n_{\chi}} r_{\chi i j \rho}(t) \cdot u_{\chi i j \rho}(t) + \sum_{\rho=1}^p \sum_{i=1}^{n_{\chi}} \pi_{\chi i \rho}(t) \cdot \vartheta_{\chi i \rho}(t) \right) dt, \quad (14)$$

здесь $r_{\chi i j \rho}(t)$ — издержки при передаче ресурса ρ типа из $A_{\chi i}$ ФЭ в $A_{\chi j}$ ФЭ в момент времени t , $\pi_{\chi i \rho}(t)$ — издержки на обработку ресурса ρ типа на $A_{\chi i}$ ФЭ в момент времени t .

Кроме приведенных показателей качества функционирования СЛО может быть предложен ряд других показателей.

Указанная задача планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО (4)–(14) относится к классу билинейных нестационарных дифференциальных динамических моделей и имеет ряд специфических черт, которые отличают их от классических задач теории оптимального управления сложными динамическими системами. Первая особенность данной задачи заключается в том, что в правых частях дифференциальных уравнений (4)–(6), описывающих процесс структурно-функциональной реконфигурации СЛО, присутствуют разрывные функции $e_{\chi ij}(t)$, определяющие структурную динамику СЛО. Поэтому рассматриваемую задачу можно отнести к задачам управления с промежуточными условиями.

Следовательно, непосредственное применение методов и алгоритмов, разработанных для решения подобных задач оптимального управления с непрерывными и непрерывно дифференцируемыми функциями, встречает трудности теоретического и прикладного характера. Другая особенность задач состоит в том, что они относятся к классу задач многокритериального выбора. Следующая особенность задачи состоит в том, что сведения об основных факторах и условиях, влияющих на успешное решение указанных задач, имеют различную степень достоверности и определённости. Кроме того, существенно затрудняет процесс планирования, как правило, отсутствие аналитической зависимости между указанными факторами и условиями, определяющими (описывающими) технологию планирования. Это в первую очередь касается факторов и условий, затрудняющих выполнение целевых задач объектами (например, возмущающие факторы со стороны внешней среды). Однако каждая эталонная траектория $S_{\chi}^{\text{Эталон}} \in S^{\text{Эталон}}$ характеризуется набором структурных состояний СЛО $\{St_{i_1, i_2, \dots, i_k}^{\chi}\}$, смену которых СЛО осуществляет на промежутке времени $T = (t_0, t_f]$ в результате ее реконфигурации. Далее будем предполагать, что заданный интервал времени $T = (t_0, t_f]$ структурной реконфигурации СЛО разбит на некоторое число L_{χ} подынтервалов $T = \{(t_0, t_1], (t_1, t_2], \dots, (t_{k-1}, t_k], \dots, (t_{L_{\chi}-1}, t_{L_{\chi}} = t_f)\}$ постоянства структуры СЛО. В каждом подынтервале $T_k = (t_{k-1}, t_k]$ СЛО находится в неизменном состоянии $St_{i_1, i_2, \dots, i_k}^{\chi}$.

Данное предположение позволяет свести многокритериальную задачу оптимального управления с разрывными правыми частями к многокритериальной статической модели планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО.

4. Статическая модель. Для сведения динамической модели (4)–(14) к ее статической интерпретации проведем интегрирование выражений (4)–(6), описывающих динамику изменения состояния системы, на интервалах постоянства структуры $T_k = (t_{k-1}, t_k]$, $k = 1, \dots, L_\chi$, так как на интервалах постоянства структуры функции $e_{\chi ij}(t)$ постоянны. При этом функции управления $u_{\chi ij\rho}(t)$, $\vartheta_{\chi ip}(t)$ трансформируются в соответствующие переменные $u_{\chi ij\rho} = \int_{t_{k-1}}^{t_k} u_{\chi ij\rho}(t) dt$, $\vartheta_{\chi ip} = \int_{t_{k-1}}^{t_k} \vartheta_{\chi ip}(t) dt$, характеризующие время передачи ресурса ρ типа из $A_{\chi i}$ ФЭ в $A_{\chi j}$ ФЭ и время обработки ресурса ρ типа в $A_{\chi i}$ ФЭ на интервале $T_k = (t_{k-1}, t_k]$, $k = 1, \dots, L_\chi$.

Тогда выражения (4)–(6), характеризующие потоки разнородного ресурса, проходящие через $A_{\chi i}$ ФЭ, можно переписать в следующем виде

$$\begin{aligned} I_{\chi ipk} + y_{\chi ip(k-1)} + \sum_{j \in N_{\chi i}^-} \omega_{\chi jipk} u_{\chi jipk} = \\ = \phi_{\chi ipk} \cdot \vartheta_{\chi ipk} + \sum_{j \in N_{\chi i}^+} \omega_{\chi jipk} u_{\chi jipk} + y_{\chi ipk} + z_{\chi ipk}, \end{aligned} \quad (15)$$

здесь $I_{\chi ipk} = \int_{t_{k-1}}^{t_k} \psi_{\chi ip}(t) dt$ — количество ресурса ρ типа, поступившее в $A_{\chi i}$ ФЭ извне на интервале T_k ; $y_{\chi ip(k-1)}$ — количество ресурса ρ типа, сохраненное в запоминающемся устройстве $A_{\chi i}$ ФЭ на интервале T_{k-1} ; $\omega_{\chi jipk}$ — интенсивность передачи ресурса ρ типа из $A_{\chi j}$ ФЭ в $A_{\chi i}$ ФЭ на интервале T_k ; $\phi_{\chi ipk}$ — интенсивность обработки ресурса ρ типа в $A_{\chi i}$ ФЭ на интервале T_k ; $y_{\chi ipk}$ — количество ресурса ρ типа, сохраненное в запоминающемся устройстве $A_{\chi i}$ ФЭ на интервале T_k ; $z_{\chi ipk}$ — количество ресурса ρ типа, потерянного в $A_{\chi i}$ ФЭ на интервале T_k ; $N_{\chi i}^- = \{j \in N_\chi \mid e_{\chi ji}(k) = 1\}$ — множество номеров ФЭ СЛО на эта-

лонной траектории $Sc_{\chi}^{\text{Эталон}}$, из которых в A_{χ_i} ФЭ на интервале времени T_k возможна передача ресурса; $N_{\chi_i}^+ = \{j \in N_{\chi} \mid e_{\chi_{ij}}(k) = 1\}$ — множество номеров ФЭ СЛО, в которые из A_{χ_i} ФЭ на интервале времени T_k возможна передача ресурса.

Физический смысл выражения (15) состоит в следующем: весь ресурс ρ типа, поступивший в A_{χ_i} ФЭ либо извне, либо из других ФЭ на интервале постоянства структуры T_k , либо находящийся в хранилище на предыдущем интервале постоянства структуры T_{k-1} , должен либо быть обработан, либо быть передан в другие ФЭ, либо быть потерян.

Введем следующие переменные: $x_{\chi_{ij\rho k}} = \omega_{\chi_{ij\rho k}} \cdot u_{\chi_{ij\rho k}}$ — количество переданного ресурса ρ типа из A_{χ_i} ФЭ в A_{χ_j} ФЭ на интервале T_k ; $g_{\chi_{i\rho k}} = \phi_{\chi_{i\rho k}} \cdot \vartheta_{\chi_{i\rho k}}$ — количество обработанного ресурса ρ типа в A_{χ_i} ФЭ на интервале T_k . Тогда выражение (15) можно записать следующим образом:

$$\left(\sum_{j \in N_{\chi_i}^+} x_{\chi_{ij\rho k}} - \sum_{j \in N_{\chi_i}^-} x_{\chi_{ij\rho k}} \right) + (y_{\chi_{i\rho k}} - y_{\chi_{i\rho k}(k-1)}) + g_{\chi_{i\rho k}} + z_{\chi_{i\rho k}} = I_{\chi_{i\rho k}}. \quad (16)$$

В выражении (16) величины $x_{\chi_{ij\rho k}}$, $y_{\chi_{i\rho k}}$, $y_{\chi_{i\rho k}(k-1)}$, $g_{\chi_{i\rho k}}$, $z_{\chi_{i\rho k}}$ являются неизвестными переменными, которые в соответствии с (7)–(10) должны удовлетворять следующим ограничениям:

$$\begin{aligned} 0 \leq x_{\chi_{ij\rho k}} \leq \omega_{\chi_{ij\rho k}} \cdot (t_k - t_{k-1}); 0 \leq y_{\chi_{i\rho k}} \leq V_{\chi_{i\rho}}; \\ 0 \leq g_{\chi_{i\rho k}} \leq \phi_{\chi_{i\rho k}} \cdot (t_k - t_{k-1}); z_{\chi_{i\rho k}} \geq 0. \end{aligned} \quad (17)$$

При формировании плана структурно-функциональной реконфигурации СЛО поиск наилучшего решения осуществляется исходя из оптимизации следующих обобщенных показателей функциональных возможностей системы:

- общий объем потерянного ресурса

$$J_{\chi_1} = \sum_{\rho=1}^p \gamma_{\rho} \sum_{i=1}^{n_{\chi}} \sum_{k=1}^{L_{\chi}} z_{\chi_{i\rho k}}; \quad (18)$$

- общий объем обработанного ресурса

$$J_{\chi_2} = \sum_{\rho=1}^p \lambda_{\rho} \sum_{i=1}^{n_{\chi}} \sum_{k=1}^{L_{\chi}} g_{\chi_{i\rho k}}; \quad (19)$$

- общий объем сохраненного ресурса

$$J_{\chi^3} = \sum_{\rho=1}^p \gamma_{\rho} \sum_{i=1}^{n_{\chi}} \sum_{k=1}^{L_{\chi}} y_{\chi i \rho k}; \quad (20)$$

➤ издержки на передачу и обработку ресурса на каждом $A_{\chi i}$ ФЭ

$$J_{\chi^{4i}} = \sum_{\rho=1}^p \sum_{j=1}^{n_{\chi}} r_{ij\rho} \sum_{k=1}^{L_{\chi}} x_{\chi ij\rho k} + \sum_{\rho=1}^p \pi_{i\rho} \sum_{k=1}^{L_{\chi}} g_{\chi i\rho k}, \quad i \in N_{\chi}, \quad (21)$$

здесь γ_{ρ} — важность ресурса ρ типа, λ_{ρ} — срочность ресурса ρ типа, — издержки при передаче единицы ресурса ρ типа из $A_{\chi i}$ ФЭ в $A_{\chi j}$ ФЭ, $\pi_{i\rho}$ — издержки на обработку единицы ресурса ρ типа в $A_{\chi i}$ ФЭ.

Кроме того можно использовать и другие частные показатели качества функционирования СЛО.

План управляемой реконфигурации $r_{ij\rho} \delta_{\chi}$ можно обобщенно представить состоящим из четырех подвекторов $x_{\chi}, y_{\chi}, g_{\chi}, z_{\chi}$ следующим образом $\delta_{\chi} = \|x_{\chi}, g_{\chi}, y_{\chi}, z_{\chi}\| = \| \|x_{\chi ij\rho k}\|, \|g_{\chi i\rho k}\|, \|y_{\chi i\rho k}\|, \|z_{\chi i\rho k}\| \|$, где $\|x_{\chi ij\rho k}\|$ характеризует передачу ресурса между ФЭ, $\|g_{\chi i\rho k}\|$ характеризует переработку ресурса в ФЭ, $\|y_{\chi i\rho k}\|$ характеризует накопление ресурса в ФЭ, $\|z_{\chi i\rho k}\|$ характеризует потери ресурса.

Тогда выражения (16), (17) задают множество допустимых планов управляемой реконфигурации $\Delta_{\chi\beta} = \{\delta_{\chi}\}$ на эталонной траектории $S_{\chi}^{\text{Эталон}}$ изменения структурных состояний СЛО. На множестве $\Delta_{\chi\beta} = \{\delta_{\chi}\}$ осуществляется выбор рациональных планов управляемой реконфигурации $\Delta_{\chi\beta}^* \subseteq \Delta_{\chi\beta}$ с учетом отношений предпочтений $\{r_i^{\alpha}\}_{i \in \Gamma}$, заданных критериальными функциями (18)–(21) ($J_{\chi^1}(\delta_{\chi}) \rightarrow \min$, $J_{\chi^2}(\delta_{\chi}) \rightarrow \max$, $J_{\chi^3}(\delta_{\chi}) \rightarrow \max$, $J_{\chi^{4i}}(\delta_{\chi}) \rightarrow \min$).

5. Разрешение многокритериальной неопределенности. Из анализа (16)–(21) следует [7, 8], что в рамках предложенной формализации задача структурно-функциональной реконфигурации СЛО с интервалами постоянства динамически изменяемой структуры сведена к многокритериальной задаче линейного программирования большой размерности с двусторонними ограничениями. При формировании

результатирующего отношения предпочтения рассматриваемой задачи будем учитывать следующие аспекты, наиболее существенные для систем передачи потоков ресурсов с перестраиваемой структурой. Во-первых, эффективность функционирования СЛО связана с полнотой доведения наиболее важных ресурсов до ее потребителей и, во-вторых, с повышением срока активного существования ФЭ СЛО и СЛО в целом. Так первый аспект отражают показатели (18)-(20):

- $J_{\chi^1} = \sum_{\rho=1}^p \gamma_{\rho} \sum_{i=1}^{n_{\gamma}} \sum_{k=1}^{L_{\gamma}} z_{\chi i \rho k}$ — общий объем потерянного ресурса;
- $J_{\chi^2} = \sum_{\rho=1}^p \lambda_{\rho} \sum_{i=1}^{n_{\gamma}} \sum_{k=1}^{L_{\gamma}} g_{\chi i \rho k}$ — общий объем обработанного ресурса;
- $J_{\chi^3} = \sum_{\rho=1}^p \gamma_{\rho} \sum_{i=1}^{n_{\gamma}} \sum_{k=1}^{L_{\gamma}} y_{\chi i \rho k}$ — общий объем сохраненного ресурса.

Указанные показатели можно связать следующим соотношением $J_{\chi^1} = I - J_{\chi^2} - J_{\chi^3}$, где I — суммарное количество поступившей извне для передачи ресурса на интервале $T = \{(t_0, t_1], (t_1, t_2], \dots, (t_{k-1}, t_k], \dots, (t_{L_{\gamma}-1}, t_{L_{\gamma}} = t_f)\}$. Следует отметить, что минимизация показателя $J_{\chi^1}(\delta_{\chi}) \rightarrow \min_{\delta_{\chi} \in \Delta_{\chi B}}$ способствует повышению значений $J_{\chi^2}(\delta_{\chi}) + J_{\chi^3}(\delta_{\chi})$ сохраненного и обработанного ресурса. С другой стороны, максимизация показателя $J_{\chi^2}(\delta_{\chi}) \rightarrow \max_{\delta_{\chi} \in \Delta_{\chi B}}$ переработанного ресурса способствует нахождению планов реконфигурации, в которых количество ресурса, накапливаемого в хранилищах ФЭ СЛО, сокращается. Согласно проведенному анализу показатели $\{J_{\chi^1}, J_{\chi^2}\}$ можно ранжировать следующим образом $J_{\chi^1} \succ J_{\chi^2}$.

Срок активного существования ФЭ СЛО (второй аспект) определяется запасами энергоресурса ФЭ, который расходуется на передачу и обработку ресурса. В этой связи следует так планировать структурно-функциональную реконфигурацию СЛО, чтобы минимизировать издержки $J_{\chi^{4i}}(\delta_{\chi}) = \sum_{\rho=1}^p \sum_{j=1}^{n_{\gamma}} r_{j\rho} \sum_{k=1}^{L_{\gamma}} x_{\chi j \rho k} + \sum_{\rho=1}^p \pi_{i\rho} \sum_{k=1}^{L_{\gamma}} g_{\chi i \rho k} \rightarrow \min_{\delta_{\chi} \in \Delta_{\chi B}}, i \in N_{\chi}$. Однако непосредственное использование показателей $J_{\chi^{4i}}(\delta_{\chi}), i \in N_{\chi}$ может привести к неравномерным издержкам ФЭ СЛО. В этой связи целесообразно учитывать предысторию функционирования ФЭ СЛО

(предыдущие издержки ФЭ — $R_{\chi 0i}$, $i \in N_{\chi}$) и минимизировать общую для всех ФЭ СЛО верхнюю грань ($v_{\chi} \rightarrow \min$) издержек

$$R_{\chi 0i} + \sum_{\rho=1}^p \sum_{j=1}^{n_{\chi}} r_{ij\rho} \sum_{k=1}^{L_{\chi}} x_{\chi ij\rho k} + \sum_{\rho=1}^p \pi_{i\rho} \sum_{k=1}^{L_{\chi}} g_{\chi i\rho k} \leq v_{\chi}, \quad i \in N_{\chi}.$$

В этом случае при поиске

$$J_{\chi 4}(\delta_{\chi}) = v_{\chi} \rightarrow \min,$$

$$\delta_{\chi} \in \tilde{\Delta}_{\chi\beta} = \Delta_{\chi\beta} \cap \{R_{\chi 0i} + \sum_{\rho=1}^p \sum_{j=1}^{n_{\chi}} r_{ij\rho} \sum_{k=1}^{L_{\chi}} x_{\chi ij\rho k} + \sum_{\rho=1}^p \pi_{i\rho} \sum_{k=1}^{L_{\chi}} g_{\chi i\rho k} \leq v_{\chi}, \quad i \in N_{\chi}\}.$$

достигается минимизация издержек, прежде всего тех ФЭ, которые на предыдущих шагах интенсивно участвовали в обмене ресурсов, что позволяет сохранить работоспособность СЛО в целом.

Таким образом, задача (16)-(21) векторной оптимизации с $n_{\chi} + 3$ критериями сведена к задаче с тремя критериями $J_{\chi 1}(\delta_{\chi}) \rightarrow \min_{\delta_{\chi} \in \tilde{\Delta}_{\chi\beta}}$,

$$J_{\chi 2}(\delta_{\chi}) \rightarrow \max_{\delta_{\chi} \in \tilde{\Delta}_{\chi\beta}}, \quad J_{\chi 4}(\delta_{\chi}) \rightarrow \min_{\delta_{\chi} \in \tilde{\Delta}_{\chi\beta}}.$$

Преодоление критериальной неопределенности указанной задачи связано, в первую очередь, с нахождением компромисса между группой показателей $\{J_{\chi 1}(\delta_{\chi}), J_{\chi 2}(\delta_{\chi})\}$, отражающих целевые аспекты функционирования СЛО, и показателем $J_{\chi 4}(\delta_{\chi})$, отражающим технические аспекты. Причем предположение о том, что показатель $J_{\chi 4}$ важнее группы показателей $\{J_{\chi 1}, J_{\chi 2}\}$ ($J_{\chi 4} \succ \{J_{\chi 1}, J_{\chi 2}\}$) может привести к тривиальным решениям $\delta_{\chi}^* = \left\| \|0\|, \|0\|, \|y_{\chi i\rho k}^*\|, \|z_{\chi i\rho k}^*\| \right\|$, обеспечивающим минимальные энергозатраты, когда ничего не передается и не обрабатывается, а весь поступающий ресурс хранится в хранилищах ФЭ СЛО или теряется. Следовательно, область компромисса лица, принимающего решение (ЛПР), существенно сужается и рациональными можно считать решающие правила, при которых обеспечивается отношение $J_{\chi 1} \succ J_{\chi 2} \succ J_{\chi 4}$. По этой причине для построения результирующего отношения предпочтения можно использовать лексикографические методы [15–18]. Лексикографическая задача многокритериального выбора сводится к решению следующей последовательности задач оптимизации:

$$\tilde{\Delta}_{\chi\beta}^1 = \arg \min_{\delta_\chi \in \tilde{\Delta}_{\chi\beta}} J_{\chi^1}(\delta_\chi) \Rightarrow \tilde{\Delta}_{\chi\beta}^2 = \arg \max_{\delta_\chi \in \tilde{\Delta}_{\chi\beta}^1} J_{\chi^2}(\delta_\chi) \Rightarrow \delta_\chi^* = \arg \min_{\delta_\chi \in \tilde{\Delta}_{\chi\beta}^2} J_{\chi^4}(\delta_\chi).$$

Одна из особенностей лексикографического метода состоит в том, что уже множество $\tilde{\Delta}_{\chi\beta}^1$, получаемое при оптимизации критериальной функции J_{χ^1} , на исходном множестве $\tilde{\Delta}_{\chi\beta}$ может содержать единственную альтернативу $\delta_\chi^* = \arg \min_{\delta_\chi \in \tilde{\Delta}_{\chi\beta}} J_{\chi^1}(\delta_\chi)$. В данной ситуации теряется возможность оптимизации по другим критериальным функциям. Для расширения возможностей применения лексикографических методов по остальным критериальным функциям введем интервальный лексикографический порядок — *метод последовательных уступок* [15–18]. В этом случае метод и соответствующий алгоритм последовательного сужения множества альтернатив $\delta_\chi^* \in \tilde{\Delta}_{\chi\beta}^2 \subseteq \tilde{\Delta}_{\chi\beta}^1 \subseteq \tilde{\Delta}_{\chi\beta}$ состоят в следующем:

$$\begin{aligned} \tilde{\Delta}_{\chi\beta}^1 &= \{ \delta_\chi \in \tilde{\Delta}_{\chi\beta} \mid J_{\chi^1}(\delta_\chi) \leq J_{\chi^1}^{\min} + \varepsilon_1 \} \Rightarrow \\ \tilde{\Delta}_{\chi\beta}^2 &= \{ \delta_\chi \in \tilde{\Delta}_{\chi\beta}^1 \mid J_{\chi^2}(\delta_\chi) \geq J_{\chi^2}^{\max} - \varepsilon_2 \} \Rightarrow \delta_\chi^* = \arg \min_{\delta_\chi \in \tilde{\Delta}_{\chi\beta}^2} J_{\chi^4}(\delta_\chi), \end{aligned}$$

где $J_{\chi^1}^{\min} = \min_{\delta_\chi \in \tilde{\Delta}_{\chi\beta}} J_{\chi^1}(\delta_\chi)$, $J_{\chi^2}^{\max} = \max_{\delta_\chi \in \tilde{\Delta}_{\chi\beta}^1} J_{\chi^2}(\delta_\chi)$.

Приведенным соотношениям может быть дана следующая интерпретация: вначале проводится оптимизация по первой целевой функции J_{χ^1} (объем потерянного ресурса), определяется минимальное значение этой функции $J_{\chi^1}^{\min} = \min_{\delta_\chi \in \tilde{\Delta}_{\chi\beta}} J_{\chi^1}(\delta_\chi)$ и вводится максимальное допустимое снижение данного показателя (уступка) ε_1 . Далее производится оптимизация по J_{χ^2} (объем обработанного ресурса), определяется максимальное значение этой функции $J_{\chi^2}^{\max} = \max_{\delta_\chi \in \tilde{\Delta}_{\chi\beta}^1} J_{\chi^2}(\delta_\chi)$ и вводится максимальное допустимое снижение данного показателя (уступка) ε_2 . Наконец, осуществляется оптимизация по показателю J_{χ^4} (издержки). Чем меньше уступки по предшествующим показателям, тем меньше возможности улучшения последующих показателей. В то же время, очевидно, что нет смысла назначать такие уступки, которые снижали бы значения показателей ниже минимальных (максимальных) значений, принимаемых этими функциями в множестве Парето (недо-

минируемых альтернатив). Варьируя уступками, получаем различные решения из области Парето (области компромиссов).

Однако множество допустимых решений $\tilde{\Delta}_{\chi\beta}$ является выпуклым многогранным множеством, а критериальные функции решаемой задачи управляемой реконфигурации являются линейными. Указанные обстоятельства позволяют для нахождения планов управляемой реконфигурации из области Парето использовать скаляризацию векторного показателя в виде аддитивной свертки Лагранжа [15–18] и введении в модель следующего критерия $J_{\text{рез}}(\delta_{\chi}) = \alpha_3 \alpha_2 J_{\chi_2}(\delta_{\chi}) - \alpha_3 \alpha_1 J_{\chi_1}(\delta_{\chi}) - \alpha_4 J_{\chi_4}(\delta_{\chi}) \rightarrow \max$, где $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$, $\alpha_1, \alpha_2 \geq 0$ — коэффициенты важности показателей J_{χ_1}, J_{χ_2} , $\alpha_3 + \alpha_4 = 1$, $\alpha_3, \alpha_4 \geq 0$ — коэффициенты важности между группой показателей $\{J_{\chi_1}, J_{\chi_2}\}$ и показателем J_{χ_4} , устанавливаемые ЛПР в конкретной обстановке функционирования СЛО.

Таким образом, задача управляемой реконфигурации на эталонной траектории $S_{\chi}^{\text{Эталон}}$ изменения структурных состояний СЛО в статической постановке окончательно имеет вид:

$$\alpha_3 \alpha_2 \sum_{\rho=1}^p \lambda_{\rho} \sum_{i=1}^{n_{\chi}} \sum_{k=1}^{L_{\chi}} g_{\chi i \rho k} - \alpha_3 \alpha_1 \sum_{\rho=1}^p \gamma_{\rho} \sum_{i=1}^{n_{\chi}} \sum_{k=1}^{L_{\chi}} z_{\chi i \rho k} - \alpha_4 v_{\chi} \rightarrow \max, \quad (22)$$

$$\left(\sum_{j \in N_{\chi_i}^+} x_{\chi i j \rho k} - \sum_{j \in N_{\chi_i}^-} x_{\chi i j \rho k} \right) + (y_{\chi i \rho k} - y_{\chi i \rho (k-1)}) + g_{\chi i \rho k} + z_{\chi i \rho k} = I_{\chi i \rho k}, \quad (23)$$

$$i \in N_{\chi}, \rho \in P, k = 1, \dots, L_{\chi},$$

$$v_{\chi} - \sum_{\rho=1}^p \sum_{j=1}^{n_{\chi}} r_{i j \rho} \sum_{k=1}^{L_{\chi}} x_{\chi i j \rho k} - \sum_{\rho=1}^p \pi_{i \rho} \sum_{k=1}^{L_{\chi}} g_{\chi i \rho k} - v_{\chi i} = R_{\chi 0 i}, \quad i \in N_{\chi}, \quad (24)$$

$$\sum_{\rho=1}^p y_{\chi i \rho k} + \eta_{\chi i k} = V_{\chi i}, \quad i \in N_{\chi}, k = 1, \dots, L_{\chi}, \quad (25)$$

$$0 \leq x_{\chi i j \rho k} \leq \omega_{\chi i j \rho k} \cdot (t_k - t_{k-1}), 0 \leq g_{\chi i \rho k} \leq \phi_{\chi i \rho k} \cdot (t_k - t_{k-1}), \quad (26)$$

$$i \in N_{\chi}, \rho \in P, k = 1, \dots, L_{\chi},$$

$$y_{\chi i \rho k} \geq 0, z_{\chi i \rho k} \geq 0, v_{\chi i} \geq 0, \eta_{\chi i k} \geq 0, v_{\chi} \geq 0, i \in N_{\chi}, \rho \in P, k = 1, \dots, L_{\chi} \quad (27)$$

и может решаться методами последовательного улучшения планов с двусторонними ограничениями на искомые переменные.

6. Модель параметрического синтеза. Задача структурно-функциональной реконфигурации на эталонной траектории $S_{\chi}^{\text{Эталон}}$ изменения структурных состояний СЛО в статической постановке имеет вид (22)–(27) или в обобщенном виде (28)–(30):

$$c_{\chi} \cdot \delta_{\chi} \rightarrow \max, \quad (28)$$

$$A_{\chi} \cdot \delta_{\chi} = b_{\chi}, \quad (29)$$

$$0 \leq \delta_{\chi} \leq \delta_{\chi}^0, \quad (30)$$

где c_{χ} — вектор целевой функции, A_{χ}, b_{χ} — матрица и вектор системы ограничений, δ_{χ}^0 — вектор ограничений на переменные δ_{χ} .

В целом вектора искоемых переменных и ограничений на переменные имеют следующую структуру:

$$\delta_{\chi} = \left\| \begin{array}{l} x_{\chi i p 1} \ x_{\chi i p 2} \dots x_{\chi i p L_{\chi}} \mid g_{\chi i p 1} \ g_{\chi i p 2} \dots g_{\chi i p L_{\chi}} \mid y_{\chi i p 1} \ y_{\chi i p 2} \dots y_{\chi i p L_{\chi}} \mid z_{\chi i p 1} \ z_{\chi i p 2} \dots z_{\chi i p L_{\chi}} \mid v_{\chi} \mid n_{\chi i 1} \ n_{\chi i 2} \dots n_{\chi i L_{\chi}} \end{array} \right\|^T,$$

$$\delta_{\chi}^0 = \left\| \omega_{\chi i p 1} \cdot (t_1 - t_0) \ \omega_{\chi i p 2} \cdot (t_2 - t_1) \dots \omega_{\chi i p L_{\chi}} \cdot (t_{L_{\chi}} - t_{L_{\chi}-1}) \mid \Phi_{\chi i p 1} \cdot (t_1 - t_0) \ \Phi_{\chi i p 2} \cdot (t_2 - t_1) \dots \Phi_{\chi i p L_{\chi}} \cdot (t_{L_{\chi}} - t_{L_{\chi}-1}) \mid \infty \dots \infty \right\|^T.$$

Вектор c_{χ} целевой функции состоит из компонент, характеризующих срочность обрабатываемого ресурса, важность потерянного ресурса в ФЭ СЛО и издержки ФЭ на передачу и обработку ресурса:

$$c_{\chi} = \left\| 00 \dots 0 \mid \alpha_3 \alpha_2 \lambda_1 \ \alpha_3 \alpha_2 \lambda_1 \dots \alpha_3 \alpha_2 \lambda_p \mid 00 \dots 0 \mid -\alpha_3 \alpha_1 \gamma_1 - \alpha_3 \alpha_1 \gamma_1 \dots - \alpha_3 \alpha_1 \gamma_p \mid -\alpha_4 \mid 00 \dots 0 \right\|^T.$$

Вектор b_{χ} системы ограничений состоит из компонент, характеризующих поступление ресурса в ФЭ СЛО на всех интервалах, описывающих количество издержек ФЭ на передачу и обработку ресурса на предыдущих этапах управления, и компонент, описывающих объемы хранилищ ФЭ СЛО:

$$b_{\chi} = \left\| I_{\chi 111} \ I_{\chi 211} \dots I_{\chi n_{\chi} p L_{\chi}} \mid R_{\chi 01} \ R_{\chi 02} \dots R_{\chi 0 n_{\chi}} \mid V_{\chi 1} \ V_{\chi 2} \dots V_{\chi n_{\chi}} \dots V_{\chi 1} \ V_{\chi 2} \dots V_{\chi n_{\chi}} \right\|^T.$$

В результате решения указанной задачи определяется оптимальное решение δ_{χ}^* (оптимальное распределение потоков) для различных эталонных траекторий $S_{\chi}^{\text{Эталон}}$ и, в частности, для оптимистического δ_{+*} и пессимистического δ_{-*} сценариев.

С практической точки зрения весьма актуальной является задача параметрического синтеза структурного состояния СЛО с целью обоснования параметров и характеристик ФЭ и связей между ними, обеспечивающих робастность процесса планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО при различных деструктивных

воздействиях в рамках оптимистической и пессимистической траекторий.

Таковыми параметрами, характеризующими особенности передачи, хранения и обработки информации различного типа, могут быть:

- Y_{ip} — объём хранилища ресурса p типа на A_i ФЭ СЛО;
- \mathfrak{W}_{ijp} — интенсивность передачи ресурса p типа между ФЭ СЛО;
- Φ_{ip} — интенсивность переработки ресурса p типа в каждом A_i ФЭ СЛО.

При этом помимо издержек на передачу r_{ijp} ресурса p типа из A_i ФЭ в A_j ФЭ, обработку π_{ip} ресурса p типа в A_i ФЭ, необходимы постоянные расходы энергоресурса на интервале $T = (t_0, t_f]$ планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО для поддержания требуемых объемов и интенсивностей Y_{ip} , \mathfrak{W}_{ijp} , Φ_{ip} синтезируемого структурного состояния системы. Обозначим постоянные издержки энергоресурса на поддержание единицы объема хранилища, передачи и обработки ресурса соответственно Λ_{ip} , R_{ijp} , Π_{ip} .

Следует отметить, что для придания робастной устойчивости процесса планирования реконфигурации СЛО в условиях динамически изменяющейся обстановки требуется, с одной стороны, минимизировать постоянные расходы на поддержание функционирования СЛО на интервале планирования $T = (t_0, t_f]$, с другой стороны, обеспечить при формировании планов структурно-функциональной реконфигурации СЛО в рамках оптимистической и пессимистической траекторий наилучшего целевого эффекта. В этой связи целесообразно максимизировать нижнюю грань интегрального показателя качества планов структурно-функциональной реконфигурации (22) для оптимистического и пессимистического сценариев развития структурной динамики

$$\alpha_3 \alpha_2 \sum_{p=1}^p \lambda_p \sum_{i=1}^{n_+} \sum_{k=1}^{L_+} g_{+ipk} - \alpha_3 \alpha_1 \sum_{p=1}^p \gamma_p \sum_{i=1}^{n_+} \sum_{k=1}^{L_+} z_{+ipk} - \alpha_4 v_+ \geq \zeta,$$

$$\alpha_3 \alpha_2 \sum_{p=1}^p \lambda_p \sum_{i=1}^{n_-} \sum_{k=1}^{L_-} g_{-ipk} - \alpha_3 \alpha_1 \sum_{p=1}^p \gamma_p \sum_{i=1}^{n_-} \sum_{k=1}^{L_-} z_{-ipk} - \alpha_4 v_- \geq \zeta.$$

Кроме того переменные

$$\delta_+ = \left\| x_{+ij\rho 1} x_{+ij\rho 2} \dots x_{+ij\rho L_+} \left| g_{+ip1} g_{+ip2} \dots g_{+ipL_+} \right| y_{+ip1} y_{+ip2} \dots y_{+ipL_+} \left| z_{+ip1} z_{+ip2} \dots z_{+ipL_+} \right| v_+ \left| v_{+i} \right| \eta_{+ip1} \eta_{+ip2} \dots \eta_{+ipL_+} \right\|^T,$$

$$\delta_- = \left\| x_{-ij\rho 1} x_{-ij\rho 2} \dots x_{-ij\rho L_-} \left| g_{-ip1} g_{-ip2} \dots g_{-ipL_-} \right| y_{-ip1} y_{-ip2} \dots y_{-ipL_-} \left| z_{-ip1} z_{-ip2} \dots z_{-ipL_-} \right| v_- \left| v_{-i} \right| \eta_{-ip1} \eta_{-ip2} \dots \eta_{-ipL_-} \right\|^T,$$

отражающие потоки ресурсов на оптимистической и пессимистической траекториях структурной динамики СЛО, должны удовлетворять ограничениям (23)-(27) с учетом следующих особенностей:

- предыстория функционирования ФЭ СЛО (предыдущие издержки ФЭ) одинакова для различных траекторий, т.е. $R_{+0i} = R_{-0i} = R_{0i}, i = 1, 2, \dots, n; n = n_+ = n_-$;
- объем хранилища ФЭ СЛО оптимистической и пессимистической траекторий совпадают $V_{+ip} = V_{-ip} = Y_{ip}, \forall i$;
- скорость передачи ресурсов и интенсивность переработки ресурсов на интервале планирования структурно-функциональной реконфигурации одинакова для оптимистической и пессимистической траекторий $\omega_{+ij\rho k} = \omega_{-ij\rho k} = \bar{\omega}_{ij\rho}, \Phi_{+ipk} = \Phi_{-ipk} = \Phi_{ip}, \forall i, j, \rho, k$;
- технические возможности хранения, передачи и обработки ресурса ограничены заданными величинами $Y_{ip} \leq Y_{ip}^{\text{зад}}, \bar{\omega}_{ij\rho} \leq \bar{\omega}_{ij\rho}^{\text{зад}}, \Phi_{ip} \leq \Phi_{ip}^{\text{зад}} \forall i, j, \rho$.

Учитывая вышесказанное, задачу параметрического синтеза структурного состояния СЛО можно представить следующим образом:

$$\alpha_5 \zeta - \alpha_6 \left(\sum_{\rho=1}^p \sum_{i=1}^n \Lambda_{ip} Y_{ip} + \sum_{\rho=1}^p \sum_{i=1}^n \Pi_{ip} \Phi_{ip} (t_f - t_0) + \sum_{\rho=1}^p \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n R_{ij\rho} \bar{\omega}_{ij\rho} (t_f - t_0) \right) \rightarrow \max, \quad (31)$$

$$\alpha_3 \alpha_2 \sum_{\rho=1}^p \lambda_{\rho} \sum_{i=1}^{n_+} \sum_{k=1}^{L_+} g_{+ipk} - \alpha_3 \alpha_1 \sum_{\rho=1}^p \gamma_{\rho} \sum_{i=1}^{n_+} \sum_{k=1}^{L_+} z_{+ipk} - \alpha_4 v_+ \geq \zeta, \quad (32)$$

$$\alpha_3 \alpha_2 \sum_{\rho=1}^p \lambda_{\rho} \sum_{i=1}^{n_-} \sum_{k=1}^{L_-} g_{-ipk} - \alpha_3 \alpha_1 \sum_{\rho=1}^p \gamma_{\rho} \sum_{i=1}^{n_-} \sum_{k=1}^{L_-} z_{-ipk} - \alpha_4 v_- \geq \zeta, \quad (33)$$

$$\left(\sum_{j \in N_{+i}^*} x_{+ij\rho k} - \sum_{j \in N_{-i}^*} x_{-ij\rho k} \right) + (y_{+ipk} - y_{+ip(k-1)}) + g_{+ipk} + z_{+ipk} = I_{+ipk}, \quad (34)$$

$$i \in N, \rho \in P, k = 1, \dots, L_+,$$

$$\left(\sum_{j \in N_{+i}^+} x_{-ijpk} - \sum_{j \in N_{-i}^-} x_{-jipk} \right) + (y_{-ipk} - y_{-ip(k-1)}) + g_{-ipk} + z_{-ipk} = I_{-ipk}, \quad (35)$$

$$i \in N, \rho \in P, k = 1, \dots, L_-,$$

$$v_+ - \sum_{\rho=1}^p \sum_{j=1}^n r_{ij\rho} \sum_{k=1}^{L_+} x_{+ijpk} - \sum_{\rho=1}^p \pi_{i\rho} \sum_{k=1}^{L_+} g_{+ipk} - v_{+i} = R_{0i}, \quad i \in N, \quad (36)$$

$$v_- - \sum_{\rho=1}^p \sum_{j=1}^n r_{ij\rho} \sum_{k=1}^{L_-} x_{-ijpk} - \sum_{\rho=1}^p \pi_{i\rho} \sum_{k=1}^{L_-} g_{-ipk} - v_{-i} = R_{0i}, \quad i \in N, \quad (37)$$

$$y_{+ipk} + \eta_{+ipk} = Y_{ip}, \quad i \in N, \rho \in P, k = 1, \dots, L_+, \quad (38)$$

$$y_{-ipk} + \eta_{-ipk} = Y_{ip}, \quad i \in N, \rho \in P, k = 1, \dots, L_-, \quad (39)$$

$$0 \leq x_{+ijpk} \leq \overline{\omega}_{ij\rho} \cdot (t_k^+ - t_{k-1}^+), 0 \leq g_{+ipk} \leq \Phi_{i\rho} \cdot (t_k^+ - t_{k-1}^+), \quad (40)$$

$$i, j \in N, \rho \in P, k = 1, \dots, L_+,$$

$$0 \leq x_{-ijpk} \leq \overline{\omega}_{ij\rho} \cdot (t_k^- - t_{k-1}^-), 0 \leq g_{-ipk} \leq \Phi_{i\rho} \cdot (t_k^- - t_{k-1}^-), \quad (41)$$

$$i, j \in N, \rho \in P, k = 1, \dots, L_-,$$

$$y_{+ipk} \geq 0, z_{+ipk} \geq 0, v_{+i} \geq 0, \eta_{+ipk} \geq 0, v_+ \geq 0, i \in N, \rho \in P, k = 1, \dots, L_+, \quad (42)$$

$$y_{-ipk} \geq 0, z_{-ipk} \geq 0, v_{-i} \geq 0, \eta_{-ipk} \geq 0, v_- \geq 0, i \in N, \rho \in P, k = 1, \dots, L_-, \quad (43)$$

$$0 \leq Y_{ip} \leq Y_{ip}^{\text{зад}}, 0 \leq \overline{\omega}_{ij\rho} \leq \overline{\omega}_{ij\rho}^{\text{зад}}, 0 \leq \Phi_{i\rho} \leq \Phi_{i\rho}^{\text{зад}}, i, j \in N, \rho \in P. \quad (44)$$

В целевой функции (31) коэффициенты важности $\alpha_5, \alpha_6 \geq 0$ ($\alpha_5 + \alpha_6 = 1$) между показателем, отражающим эффективность планов структурно-функциональной реконфигурации, и показателем постоянных расходов на поддержание функционирования СЛО на интервале планирования $T = (t_0, t_f]$, устанавливаются ЛПР с учетом конкретной обстановки применения системы.

В целом задача параметрического синтеза структурного состояния СЛО (31)-(44) представляет собой задачу линейного программирования большой размерности с двусторонними ограничениями.

7. Заключение. В рамках развиваемой теории управления структурной динамикой СЛО [14] актуальным является решение задачи планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО. В статье приведена обобщенная постановка задачи планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО при выполнении технологических операций приема, передачи, хранения и обработки ресурсов различного типа. Динамическая интерпретация процессов выполнения операций информационного и/или материального обмена позволяет

математически формализовать задачу планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО. Динамическая модель оптимального управления адекватно учитывает и описывает возможные сценарии развития ситуаций, связанных со структурной динамикой СЛО. Проведен анализ путей перевода многокритериальной динамической модели с разрывными правыми частями системы дифференциальных уравнений к однокритериальной статической модели планирования. Используя статическую модель, предложен подход к построению модели параметрического синтеза структуры СЛО, обеспечивающей робастность процесса планирования.

Литература

1. *Тарасов, А. А.* Управление функциональной реконфигурацией отказоустойчивых систем / *А. А. Тарасов* // Информационные технологии. – 2000. – № 8. – С. 11–15.
2. *Турута Е. Н.* Конспект лекций по дисциплине: «Распределенные вычислительные системы и сетевые технологии» - раздел «Отказоустойчивость распределенных вычислительных систем» / *Е. Н. Турута*. – М.: МТУСИ, 2001. – 24 с.
3. *Богатырев В. А.* Отказоустойчивые многомашинные вычислительные системы динамического распределения запросов при дублировании функциональных ресурсов / *В. А. Богатырев* // Изв. вузов. Приборостроение. – 1996. – № 4. – С. 81–84.
4. *Богатырев В. А.* Надежность вариантов размещения функциональных ресурсов в однородных вычислительных сетях / *В. А. Богатырев* // Электронное моделирование. – 1997. – № 3. – С. 21–29.
5. *Бородакий Ю. В.* О функциональной устойчивости информационно-вычислительных систем / *Ю. В. Бородакий, А. А. Тарасов* // Информационное противодействие угрозам терроризма. – 2006. – № 7. – С. 79–93.
6. *Хоар Ч.* Взаимодействующие последовательные процессы / *Ч. Хоар*. – М.: Мир, 1989. – 264 с.
7. *Москвин Б. В.* Комбинированные модели и алгоритмы планирования децентрализованной обработки информации / *Б. В. Москвин, А. Н. Павлов, Б. В. Соколов, М. А. Колтин* // Управление в распределенных сетцентрических и мультиагентных системах: материалы научно-технического семинара. – СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор», 2010. – с. 67–70.
8. *Москвин Б. В.* Комбинированные модели управления структурной динамикой сложных технических объектов / *Б. В. Москвин, Е. П. Михайлов, А. Н. Павлов, Б. В. Соколов* // Известия Вузов. Приборостроение. – 2006. – том №49, №11. – с. 8–12.
9. *Павлов А. Н.* Методологические основы решения проблемы планирования структурно-функциональной реконфигурации сложных объектов / *А. Н. Павлов* // Известия Вузов. Приборостроение. – 2012. – том 55(11). – С. 7–12.
10. *Павлов А. Н.* Постановка и анализ возможных путей решения задачи реконфигурации катастрофоустойчивой информационной системы / *А. Н. Павлов* // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2011. – №4, т.9. – С. 15–21
11. *Соколов Б. В.* Комплексное планирование операций и управление структурами в АСУ активными подвижными объектами / *Б. В. Соколов*. – СПб.: МО, 1992. – 232 с.

12. *Калинин В. Н.* Теория систем и управления (структурно–математический подход) / *В. Н. Калинин, Б. А. Резников.* – Л.: ВИКИ, 1987. – 417 с.
13. *Месарович М.* Общая теория систем: математические основы / *М. Месарович, Я. Такахара.* – М.: Мир, 1978. – 312 с.
14. *Охтилев М. Ю.* Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов / *М. Ю. Охтилев, Б. В. Соколов, Р. М. Юсулов.* – М.: Наука, 2006. – 410 с.
15. Военная системотехника и системный анализ. Модели и методы принятия решений в сложных организационно–технических комплексах в условиях неопределённости и многокритериальности: учебник / *Б. В. Соколов, Б. В. Москвин, А. Н. Павлов и др.; под общей ред. Б. В. Соколова.* – СПб.: ВИККУ имени А. Ф. Можайского, 1999. – 496 с.
16. *Подиновский В. В.* Оптимизация по последовательно применяемым критериям / *В. В. Подиновский, В. М. Гаврилов.* – М.: Советское радио, 1975. – 192 с.
17. *Подиновский В. В.* Парето–оптимальные решения многокритериальных задач / *В. В. Подиновский, В. Д. Ногин.* – М.: Наука, 1982. – 254 с.
18. *Ларичев О. И.* Объективные модели и субъективные решения / *О. И. Ларичев.* – М.: Наука, 1987. – 143 с.

Павлов Александр Николаевич — к.т.н., доцент; старший научный сотрудник лаборатории информационных технологий в системном анализе и моделировании СПИИРАН. Специалист в области системного анализа и принятия решений в условиях существенной неопределенности. Область научных интересов: разработка научных основ теории управления структурной динамикой сложных организационно-технических систем. Автор более 140 научных трудов. pavlov62@list.ru; СПИИРАН, 14-я линия В.О., д. 39, Санкт-Петербург, 199178, РФ; р.т. +7(812)328-0103, факс +7(812)328-4450.

Pavlov Alexander Nikolaevich — PhD., associate professor; senior researcher, Laboratory for Information Technologies in Systems Analysis and Modeling, SPIIRAS. Specialist in the field of systems analysis and operations research by conditions of substantial uncertainty. Research interests: development of research fundamentals for the control theory by structural dynamics of complex organizational-technical systems. The number of publications — more than 140. pavlov62@list.ru; SPIIRAS, 39, 14-th Line V.O., St. Petersburg, 199178, Russia; office phone +7(812)328-0103, fax +7(812)328-4450.

Поддержка исследований. Исследования, выполненные по данной тематике, проводились при финансовой поддержке РФФИ (гранты 10-07-00311, 11-08-01016, 11-08-00767, 12-06-00276, 12-07-00302), ОНИТ РАН (проект №2.11), Программы ESTLATRUS: проекты 1.2/ELRI-121/2011/13, 2.1/ELRI-184/2011/14.

Рекомендовано лабораторией информационных технологий в системном анализе и моделировании, заместитель директора по научной работе Соколов Б.В., д-р техн. наук, проф.

Статья поступила в редакцию 27.04.2013.

РЕФЕРАТ

Павлов А.Н. **Комплексное моделирование структурно-функциональной реконфигурации сложных объектов**

Технология структурно-функциональной реконфигурации занимает одно из первостепенных значений среди способов обеспечения живучести и устойчивости сложных объектов (СЛО). Отличие рассматриваемой реконфигурации от классической («слепой»), нацеленной на компенсацию отказов, состоит в гибком перераспределении выполняемых системой целей, задач и функций между работоспособными, частично работоспособными функциональными элементами. Для конструктивного решения задачи планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО в статье разработаны формальное описание различных аспектов процесса структурно-функциональной реконфигурации СЛО и соответствующие модели планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО. Для обобщенной постановки задачи планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО предложена теоретико-множественная модель в виде математической структуры выбора с мультипредпочтением и множеством неопределенности.

Конкретизируя обобщенную постановку и, используя динамическую интерпретацию процессов выполнения операций информационного и/или материального обмена различных типов ресурсов, построена математическая модель планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО, которая относится к классу многокритериальных билинейных нестационарных дифференциальных динамических моделей с разрывными функциями в правых частях дифференциальных уравнений, определяющих структурную динамику СЛО.

Предположение о том, что интервал времени структурной реконфигурации СЛО состоит из участков постоянства структуры объекта, позволило свести многокритериальную задачу оптимального управления с разрывными правыми частями к многокритериальной статической модели планирования структурно-функциональной реконфигурации СЛО, представляющей собой многокритериальную задачу линейного программирования большой размерности с двусторонними ограничениями.

Опираясь на предложенную статическую модель, в статье обоснована и разработана модель параметрического синтеза структурного состояния СЛО, обеспечивающая робастность процесса планирования реконфигурации СЛО в рамках оптимистического и пессимистического сценариев развития его структурной динамики.

SUMMARY

Pavlov A.N. Integrated modelling of the structural and functional re-configuration of complex objects.

Technology of the structural and functional reconfiguration is one of the utmost importance among the ways to ensure the survivability and sustainability of complex objects (CO). Unlike considered reconfiguration from the classical ("blind"), aimed at compensation of failures, is a flexible reallocation of the system's goals, objectives and functions between operational, partially operable functional elements. For constructive solutions for the planning of structural and functional reconfiguration of CO in the article to develop a formal description of the various aspects of the structural and functional reconfiguration of CO and the relevant planning model of structural-functional reconfiguration of CO. For the generalized formulation of the problem of planning the structural and functional reconfiguration of CO suggested a set-theoretic model in the form of the mathematical structure of choice with multipredpochteniem and the set uncertainties.

Specifying a generalized statement and using the dynamic interpretation of the process of operations information and / or material exchange of different types of resources, a mathematical model of the planning of structural and functional reconfiguration of CO, which belongs to a class of bilinear time-dependent multiobjective differential dynamic models with discontinuous functions on the right sides of differential equations, determining the structural dynamics of CO.

The assumption that the time interval of structural reconfiguration of the sections of CO is the constancy of the object structure, enabled us to reduce multiobjective optimal control problem with discontinuous right to multiobjective static planning model of structural-functional reconfiguration of CO, which is a multiobjective linear programming problem big dimension to bilateral restrictions.

Based on a static model proposed in the article the developed model and parametric synthesis of the structural state of CO, providing the robustness of the planning process as part of the reconfiguration of CO optimistic and pessimistic scenarios for the development of its structural dynamics.