

ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕОРИЯ ЭРГАСИСТЕМ: ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Ловцов Д.А.*

Ключевые слова: информационная теория, эргасистемы, концептуальные утверждения, ценность информации, переработка информации, защищенность информации, информационная эффективность, информационные условия, информационные меры, информационная база, информационные технологии, ситуационное планирование, принципы, модели, методы, требования.

Аннотация.

Цель работы: совершенствование научно-методической базы теории правовой информатики.

Метод: системный анализ, концептуально-логическое и математическое моделирование эргасистем и информационных процессов, формально-логическая разработка эффективных математических методов, имеющих методологическое значение для правовой информатики.

Результаты: общая содержательная характеристика теоретико-методологических и формально-математических положений информационной теории эргатических систем, имеющих теоретическое и практическое значение в сфере информатизации и автоматизации управления (регулирования), соответствующего производства и образования; математические модели: эргасистемы и функциональных подсистем, информационного процесса, измерения информации, ситуации принятия решений, процесса формулировки задач; система информационных показателей и критерий эффективности эргасистемы; условия наблюдаемости и управляемости сложного динамического объекта (СДО); математические методы: тест-динамической оптимизации ситуационного упорядочения задач переработки информации в иерархической системе, методы распределенной телеработки информации, робастного ситуационного функционального контроля состояния СДО, ситуационного планирования и прогнозирования процессов обмена привилегированной информацией в неоднородной стационарно-мобильной системе, телеконтроля бортовых подсистем СДО.

Значимость рассмотренных положений обусловлена инвариантностью значительной их части к конкретной проблемной области (функции) управления.

DOI: 10.21681/1994-1404-2019-3-04-20

Введение

Эргатические системы (эргасистемы) как человеко-машинные системы управления сложными динамическими объектами (СДО) технических, технологических, экономических, экологических, организационных, правовых [8] и др. комплексов и отношений в соответствии с целями функционирования должны обеспечить выполнение заданных вещественно-энергетических процессов. Однако их функционирование, развитие и само существование как единого целого определяется *информационными процессами* (технологическими процессами переработки информации – ТППИ). Существующий аппарат общей информационной теории (ИТ) управления, базирующийся на статистических и комбинаторных подходах, является синтаксическим (не

исследующим содержательные и ценностные аспекты информации) и малопродуктивным для использования в системном анализе [1, 4, 18] и оптимизации реальных процессов управления СДО, а также для обоснованного внедрения и рационального использования новых информационных технологий (НИТ) в эргасистеме, реализующих новую парадигму *объектно-ориентированного программирования*¹ («от структур данных, описывающих систему понятий предметной области, к программированию функций перехода между ними, отражающих сущность соответствующего информационного процесса»), основанную на принципе «автоформализации» профессиональных знаний операторов-парапрограммистов [9].

¹ Бадд Т. Объектно-ориентированное программирование в действии. СПб.: Питер, 1997. 464 с.

* **Ловцов Дмитрий Анатольевич**, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки Российской Федерации, заместитель по научной работе директора Института точной механики и вычислительной техники им. С. А. Лебедева Российской академии наук, заведующий кафедрой информационного права, информатики и математики Российского государственного университета правосудия, г. Москва, Российская Федерация.

E-mail: dal-1206@mail.ru

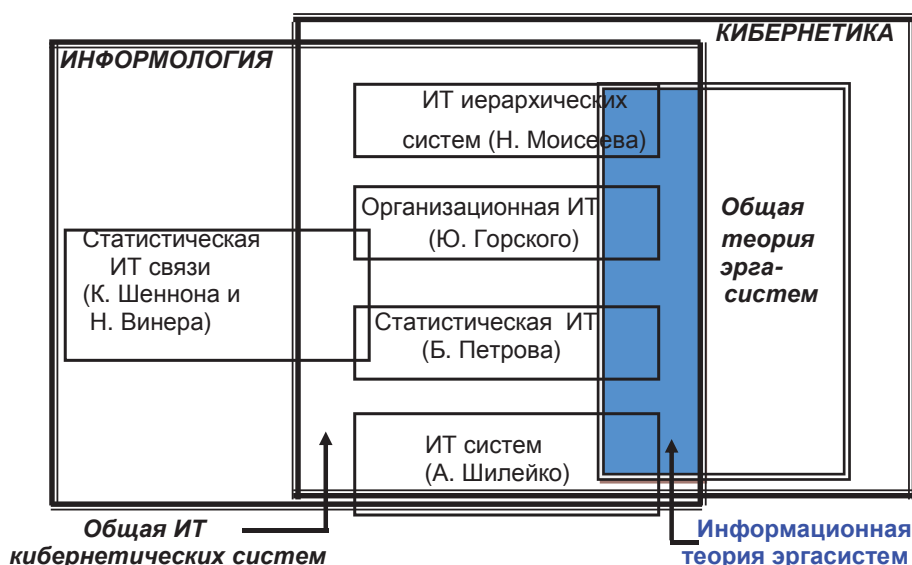


Рис. 1. Место информационной теории эргасистем в системе информационно-кибернетических наук

В связи с этим существует необходимость в разработке методов информационно-математического многоаспектного описания, анализа, представления, синтеза и оптимизации эргасистем, позволяющих исследовать процессы управления СДО с точки зрения как иерархии целей, так и процессов переработки информации как средства достижения этих целей, т. е. необходимость разработки *информационной теории эргасистем* как обобщение известных фундаментальных информационных теорий² (рис. 1), позволяющей создавать информационно-математическое обеспечение (ИМО) специальных НИТ решения функциональных и целевых задач эргасистем различного назначения, применение которого обеспечивает повышение *информационной эффективности* эргасистем.

Проблема обеспечения информационной эффективности эргасистем в условиях глобальной информатизации и «цифровой» экономики приобретает новые черты и возможности. В связи с этим конечной целью обсуждаемых исследований является внедрение рациональной методологии обеспечения высокой информационной эффективности эргасистем и уменьшения трудоемкости их проектирования и разработки, базирующейся на принципах проблемно-ориентированного комплексного «ИКС»-подхода («информационно-кибернетически-синергетического») [10] и содержащей совокупность основных положений новой информационной теории эргасистем.

² См., в частности: Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике. М. : Ин. Лит-ра, 1963; Моисеев Н. Н. Математические задачи системного анализа. М. : Наука, 1982; Горский Ю. М. Информационные аспекты управления и моделирования. М. : Наука, 1978; Петров Б. Н., Уланов Г. М., Ульянов С. В., Хазен Э. М. Информационно-семантические проблемы в процессах управления и организации. М. : Наука, 1977; Шилейко А. В., Кочнев В. Ф., Химушин Ф. Ф. Введение в информационную теорию систем. М. : Радио и связь, 1985.

1. Методы исследований

Путь решения проблемы:

1. Разработка и применение комплексного «ИКС»-подхода (рис. 2) на основе интеграции методологии *информационного* подхода (при котором эргасистема рассматривается как целенаправленная информационная система), методологии *кибернетического* подхода (при котором эргасистема рассматривается как система управления на уровне информационных процессов и алгоритмов функционирования информационной базы), методологии *синергетического* подхода (при котором эргасистема рассматривается как динамическая самоорганизующаяся система, взаимодействующая со средой) в рамках методологии *системного* подхода (при котором эргасистема рассматривается как сложноорганизованная многоаспектная система) в составе *структурно-математического* (при котором обеспечивается необходимый уровень математизации системных «ИКС»-понятий), *операционного* (при котором в многослойной автоматизированной имитационной модели операции объединяются математические и логико-лингвистические описания цели, процесса и результатов операции), *ситуационного* (при котором принятие решений осуществляется в динамике в реальном времени функционирования эргасистемы с учетом сложившейся ситуации) подходов [8 – 10].

2. Использование соответствующего формально-математического аппарата системологии, кибернетики, информологии, общей алгебры, теорий исследования операций, расписаний, эксплуатации, формальных грамматик, криптологии, математического программирования, логико-лингвистического моделирования, структурного программирования (на ЭВМ), математической статистики, информационного права и др.



Рис. 2. Концептуальный вариант комплексного «ИКС»-подхода к анализу и оптимизации эргасистем

2. Результаты

Основы информационной теории эргасистем (рис. 3), обобщающие и развивающие результаты общей ИТ кибернетических систем и общей теории эргасистем, представленные в виде совокупности методологических положений ИТ эргасистем, теоретических положений синтеза и оптимизации информационных процессов, информационной базы и объединённой подсистемы контроля и защиты информации (КЗИ) в эргасистеме, позволяющие создавать эффективное ИМО специальных НИТ, внедрение которых обеспечивает повышение *информационной эффективности* (преобразующей способности, добротности, информационного воздействия, производительности, надёжности, защищённости и др.), а также оперативности функционирования, устойчивости и живучести [2, 6, 9, 12, 17–19] иерархических интегрированных эргасистем при одновременном уменьшении трудоёмкости их проектирования, испытания, внедрения, эксплуатации и развития (совершенствования).

3. Методологические положения информационной теории эргасистем

Определяют *понятийный* аппарат (проблемно-ориентированный вариант комплексного «ИКС»-подхода, достаточно полная совокупность непротиворечивых терминов и определений методологических понятий, концептуальные модели, принципы и утверждения, парадигма информационной эффективности эргасистем)

и *формально-математический* аппарат (математические модели целенаправленных иерархических эргасистем, информационных процессов, ТППИ, семантики информации, общесистемного тезауруса; математические меры количества структурной и содержательной информации в эргасистеме; система информационных показателей целевой и технологической эффективности и качества эргасистем; необходимые и достаточные условия наблюдаемости и управляемости СДО (в частности, активного подвижного объекта) по аппаратуре; методологическая диаграмма и методика разработки (с обоснованными специальными и техническими требованиями) ИМО, упорядочивающие мероприятия, связанные с автоматизацией и рациональной организацией информационных процессов и базы эргасистемы) [1, 4, 5, 9].

Концептуальная модель (рис. 4) эргасистемы представляется в виде семикомпонентного комплекса функциональных подсистем (ФПС) измерения (P_1), наблюдения (P_2), идентификации (P_3), выработки управляющих решений (P_4), централизованной координации и организационного управления (P_5), информационного обмена (P_6), информационной защиты (P_7) [4, 9]. Подсистема P_7 носит дополнительный характер, поскольку необходима только при функционировании эргасистемы в информационно-агрессивной среде и, кроме того, снижает общую информационную производительность системы из-за затрат части ресурсов эргасистемы на реализацию специальных процедур обеспечения *конфиденциальности* информации.

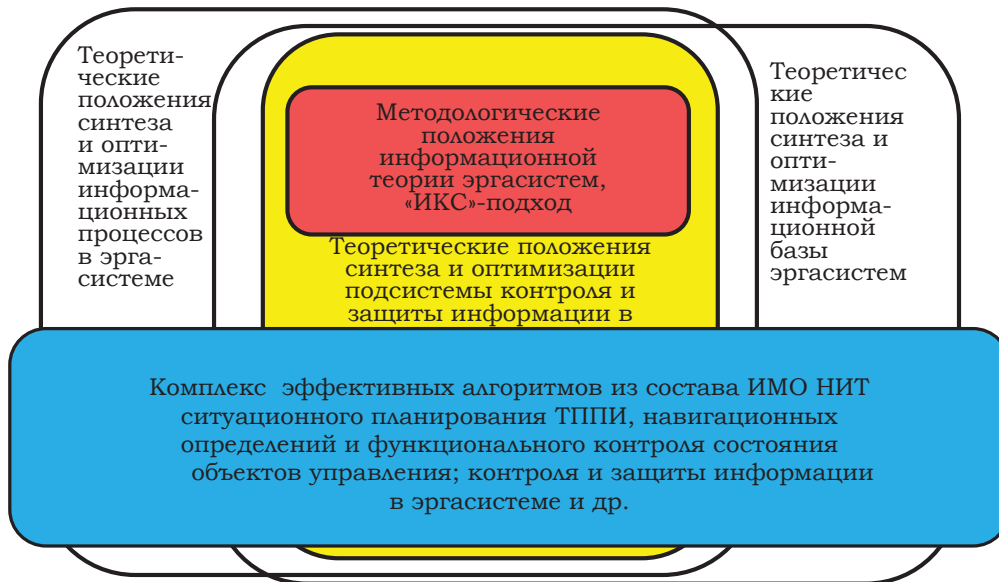


Рис. 3. Общая структура разработанных основ информационной теории эргасистем

Для обеспечения совместимости и непротиворечивости комплекса (ансамбля) методов контроля и защиты информации [14] в эргасистеме представляется целесообразным создание объединённой подсистемы КЗИ, включающей (см. рис. 4) подсистему P_7 и совокупность функций (задач) обеспечения достоверности и сохранности информации [6], выполняемых в основных ФПС.

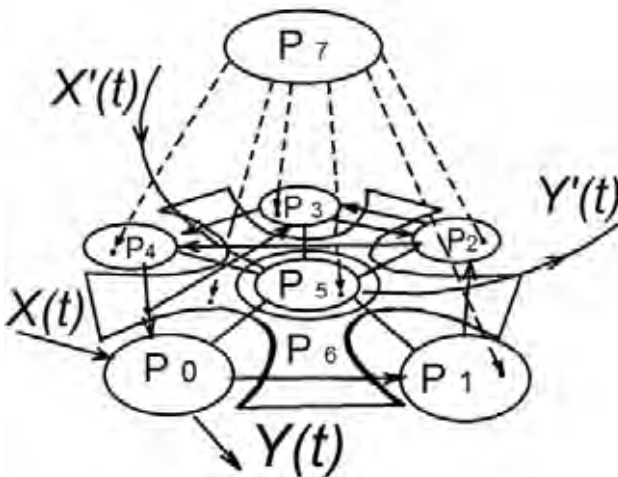


Рис. 4. Инвариантная функциональная структура информационно защищённой эргасистемы

Интегративным для эргасистемы является обоснованный «трёхэкстремальный» (*) принцип информационной ценности (эффективности): информационный ресурс³ ($Q_{\text{п}}$ – перерабатываемая информация) эргасистемы следует использовать рациональным способом (по специальной НИТ W^*) и только для переработки

ценной (качественной) информации (Q_o^* – осведомляющая информация), на основе которой действительно возможна выработка оптимальных (при заданном ограничении на количество I_o информации) управляющих решений (U_G^*), ведущих к достижению целей (G) управления [5, 8, 9, 11]:

$$Q_{\text{п}} \xrightarrow{W^*} Q_o^* \longrightarrow U_G^* \mid I_o. \quad (1)$$

При этом под информацией понимается свойство объектов (процессов) окружающего материального мира порождать разнообразие состояний, которые посредством отражения передаются от одного объекта к другому (пассивная форма) и средство ограничения разнообразия и организации, т. е. управления, дезорганизации и др. (активная форма). Причём в эргасистеме наибольшее значение имеют активные формы проявления информации (преобразующая, координирующая, управляющая, выработки решения и др. [4, 8, 9]), поскольку они являются причиной изменения состава, структуры и свойств (параметров) системы и управляемых и обрабатываемых [7, 19] объектов.

Выбор и рациональное распределение (табл. 1) [9, 13] между ФПС эргасистемы адекватных (удобных, приемлемых и др.) математических форм (моделей, мер) представления информации осуществляется для наиболее характерных в эргасистеме видов информации: содержательной Q_z (включая Q_z' – коммуникационную или шенноновскую) и структурной Q_v (выявленных на основе применения интегрального атрибутивно-функционального подхода [8, 9]) с учетом качества содержательной информации как иерархии следующих внутренних и внешних свойств, соответственно [9, 11]:

<актуальность> := {<пертинентность (релевантность, полнота)>, <неисчерпаемость>, <кумулятивность (гомоморфизм, избирательность)>};

³Ловцов Д. А. Модели измерения информационного ресурса АСУ // Автоматика и телемеханика. 1996. № 9. С. 3–17.

Функциональные подсистемы эргасистемы (см. рис. 4)	Адекватные информационные меры
P_1	$I_C(R_1 R_2)$ – Кульбака, $I_F\{R(s, V) R(s, V+\delta V)\}$ – Фишера
P_1, P_6	$H_S(p_m, N)$ – Шеннона
P_2, P_3	$K_f(s)$ – Колмогорова, $H_{ЛК}\{(p)\delta(x)\}$ – Ловцова – Князева
P_2, P_3, P_5	$I_{ШК}(\Theta)$ – Шилейко – Кочнева, $I_{Л}(\Theta)$ – Ловцова
P_4	$\Delta_{П}(J)$ – Петрова, $H_C(D, D^0)$ – Сухова
P_4, P_5	$I_X(P_G)$ – Харкевича, $\Delta_M(J)$ – Моисеева
P_5	$H_{Ш}(m, T)$ – Шрейдера
P_5, P_6	$H_H(N)$ – Хартли
P_7	$H_{ЛК}\{(p)\delta(x)\}$ – Ловцова – Князева

<защищённость> := {<достоверность (помехоустойчивость, помехозащищённость)>, <сохранность (целостность, готовность)>, <конфиденциальность (доступность, скрытность, имитостойкость)>}.
 Совокупность информационных мер (Кульбака I_C , Фишера I_F , Шеннона H_S , Колмогорова K_f , Ловцова – Князева $H_{ЛК}$, Шилейко – Кочнева $I_{ШК}$, Ловцова $I_{Л}$, Петрова $\Delta_{П}$, Сухова $H_C(D, D^0)$, Харкевича I_X , Моисеева Δ_M , Шрейдера $H_{Ш}$, Хартли H_H), используемых в эргасистеме, позволяющая реализовать принцип информационной эффективности, должна отвечать следующим основным требованиям: адекватность, согласованность, эффективность, аддитивность, понятность [3–5, 9, 20, 21].

Согласно выражению (1), под ценностью информации понимается её значимость, определяемая способом динамического отображения множества её качественных свойств (K_Q) и количественных характеристик (I) на множество возможных управляющих решений (U_G), ведущих к достижению целей (G) управления:

$$J_Q(t) : K_Q \times I \times T \longrightarrow U_G, t \in T. \quad (2)$$

Исходное концептуальное утверждение состоит в том, что с ростом информационной энтропии H системы Θ при прочих равных условиях степень неопределенности системы не изменяется, а возрастает количество M способов реализации определенного состояния $s_i \in S$ системы:

$$\{H[\Theta_1(S_1)] < H[\Theta_2(S_2)]\} \implies M_2(s_{i2}) > M_1(s_{i1}), s_i \in S, |S_2| > |S_1|. \quad (3)$$

Алгебраическая структурно-функциональная модель эргасистемы представляется в виде системы взаимосвязанной по определенным правилам совокупности универсальных алгебр Θ и гомоморфизма g :

$$\{\Theta = \langle E, C, \Phi, G \rangle; g: G \longrightarrow \Phi\}, \quad (4)$$

где $E = \langle S, R \rangle$ – основное множество-носитель, представляющее собой множество функциональных элементов эргасистемы, включающих подмножество основных средств $S = \{s_l\}, l = 1, \dots, L$ (организаций, подразделений, комплексов средств автоматизации (КСА) и др.), подмножество дополнительных средств $R = \{r_k\}, k = 1, \dots, K$ (ресурсов – информационных, материальных, энергетических и др.); $C = \{c_i\}, i = 1, \dots, n$ – дистрибутивная решетка, представляющая собой множество

возможных информационных каналов (каналов связи, показателей управления, наименований информационных массивов (ИМ) и др.) $c_i \in C$ между функциональными элементами эргасистемы; $\Phi \subseteq O(S, C)$ – подрешетка дистрибутивной решетки

$$O(S, C) = \{\varphi | \varphi : S^2 \longrightarrow C\},$$

где $O(S, C)$ – дистрибутивная решетка, т. е. частично упорядоченное множество всех отображений декартова квадрата $S \times S = S^2$ в решетку C , представляющая собой множество допустимых отображений, индуцирующих соответствующие иерархические информационно-распределительные структуры в виде матриц

$$\varphi \equiv \|M_\varphi\| = \{c_{ij}(s_1, s_2)\}; i, j = 1, \dots, L; s_1 = i, s_2 = j,$$

Информационная теория эргасистем: основные положения

и включающее подмножество отображений $m_i \in M, i = 1, \dots, l$, ставящих в соответствие каждой паре $\langle s_1, s_2 \rangle \in S$ основных элементов носителя E информационный канал $c = \varphi(s_1, s_2), c \in C$ между ними;

$$a_1 * a \prec a_2 * a, \quad a * a_1 \prec a * a_2 \mid a_1 \prec a_2 \quad \forall a_1, a_2, a \in A^{(p)},$$

и представляющая собой множество задач (целей) $a \in A^{(p)}$, стоящих перед эргасистемой, включающее ориентированный граф задач переработки информации (ЗПИ) без петель и контуров с множеством вершин $A^{(p)} = \{a_1, a_2, \dots, a_{N_p}\}$, отображающих заданное множество ЗПИ, и множеством дуг $B \in A^{(p)} \times A^{(p)}$, отображающих частичный порядок в ТППИ.

Задание ограничения отображения в модели понимается как сопоставление паре $\langle a_i, \varphi_j \rangle$ (ЗПИ $a_i \in G$ и ситуационной структуры $\varphi_j \in M$ эргасистемы) соответствующей новой структуры

$$I_v(\Theta) = I_{\text{Л}}(\Theta) = m_s \ln(n_s) + m_r \ln(n_r) + \{[\sum_i \ln(\Lambda_i / \epsilon_{ci})] \vee [m_c \ln(2)] + [m_a \ln(n_a) + m_b \ln(2)]\} \vee [\sum_k m_{ck} \ln(2)] + m_\varphi \ln(n_\varphi),$$

$$m_s + m_r + m_c + m_\varphi + m_a + m_b = \min; \quad i = 1, \dots, n_c; \quad k = 1, \dots, n'_\varphi,$$

где $m_s, m_r, m_c, m_\varphi, m_a, m_b$ – число подстрингов (символов и др.), представляющих элементы $s \in S, r \in R, c \in C, \varphi \in \Phi, a \in A^{(p)}, b \in B$ в минимальном стринге-описании данной системы Θ (подсистемы), соответственно.

Мера обладает свойствами аддитивности, универсальности, детерминированности (не требует статисти-

$G = [A^{(p)}, B], p = 1, \dots, m$ – мультирешетка, т. е. дистрибутивная решетка, дополнительно наделенная операцией композиции (*) и отношением предшествования (<), такими, что:

$\varphi' = g(a_i)\varphi_j; \quad \varphi' \in \Phi; \quad i = 1, \dots, N_p; \quad j = 1, \dots, l$, отражающее «перестройку» эргасистемы под влиянием ЗПИ a_i .

Условие гомоморфности отображения g означает, что «перестройка» обладает инерционностью, т. е. не меняет радикально взаимодействия между различными структурами и согласована с отношением порядка [2].

Соответствующая мера полной структурной информации Q_v , т. е. информации о «жизненном цикле» эргасистемы, равна (см. табл. 1) [9, 13, 15]:

ческих данных), конструктивности (не требует ансамбля объектов), независимости от потребителя.

Структурно-математическая модель ТППИ, определяющая основные виды переработки информации и соответствующих ТППИ (табл. 2), представляется в виде композиции правил-отображений преобразования и интерпретации M, Q_z [15]:

$$\begin{array}{ccc}
 & A_o(T) & \\
 M_o & \xrightarrow{\quad} & Q_{zo}(T) \\
 A_M(Q_v, Q_z') \downarrow & & \downarrow A_Q(Q_v, T) \\
 & A_I(T) & \\
 M_I & \xrightarrow{\quad} & Q_{z1}(T)
 \end{array} \quad (5)$$

где M_o, M_I – множества исходных информационных массивов (сообщений, сигналов) и преобразованных ИМ, соответственно; Q_{zo}, Q_{z1} – исходное индивидуальное (для конкретного потребителя) и используемое для интерпретации преобразованных ИМ множества троек $\langle \text{имя-смысл-значение} \rangle$, соответственно; $A_o(T), A_I(T)$ – отображения, реализующие правила интерпретации исходных и преобразованных ИМ, соответственно (в частном случае они могут совпадать); $A_M(Q_v, Q_z')$ – ото-

бражение, реализующее правило преобразования ИМ, определяемое структурной информацией Q_v потребителя и структурно-статистической информацией Q_z' источника; $A_Q(Q_v, T)$ – отображение, реализующее правило преобразования информации, в случае, если отображение A_o биективно (элемент $Q_{zo}(T)$ имеет не более одного прообраза в M_o), в противном случае – отношение наличия в множествах Q_{zo}, Q_{z1} общего прообраза в M_o , не сохраняющее информацию.

Таблица 2

Основные виды переработки информации и соответствующих ТППИ

Биективность		Тип ТППИ
$A_M(Q_v, Q_z')$	$A_Q(Q_v, T)$	
+	+	Без потери Q_z
–	+	Со сжатием m (с потерей Q_{vm})
–	–	С потерей Q_z

Теоретические основы правовой информатики

Алгебраическая модель процесса детерминированного преобразования ИМ представляется в следующем виде [15]:

$$\{ \langle M_0, M_1, \Phi, \Omega, f(M_0, M_1, \Omega) \rangle; a_M(Q_v): M_0 \times \Omega \longrightarrow M_1 \times \Omega \}, \quad (6)$$

где M_0 – множество исходных ИМ-оригиналов; M_1 – множество ИМ, преобразованных с использованием некоторого алгоритма $a_{Mi} \in A_M$ преобразования (выполнения ЗПИ соответствующего вида); Φ – структура алгебраической модели Θ информационного узла (ФПС) вида (4); Ω – множество факторов неопределенности (техническая ненадежность средств информационного узла, различные виды погрешностей преобразования, неприменимость отдельных a_{Mi} к некоторым ИМ $m_{oi} \in M_0$ и др.); f – конкретный вид ситуационного

(характеризуется Ω) распределения сложных событий, состоящих в том, что на входе узла действует ИМ $m_{oi} \in M_0$, а на выходе через определенный промежуток времени τ появляется преобразованный ИМ $m_{1j} \in M_1$. Количество информации $Q_z(m, T)$, содержащейся в ИМ $m \in M$ относительно модели предметной области (тезауруса) $T = \{ \langle X, Y \rangle, Z \}$, равно степени изменения тезауруса под воздействием соответствующего оператора $O_m \subseteq O$; $O_m = \{ o_{mi} \}, i = 1, \dots, I$ [15] (см. табл. 1):

$$I_z(m, T) = H_{III}(m, T) = \ln[T(O_m)/T] = \ln\{ [\sum_i n_{i(o)}] / (\sum_i n_i) \},$$

где $n_i, i = x, y, z$ – кардинальное число i -го множества; X – множество понятий <имя-смысл-значение>; Y – множество предикатов различного вида; Z – множество событий, на котором заданы логические операции и специальные кванторы.

Система *информационных показателей*⁴ эффективности (технологической и целевой) и качества эргасистемы с произвольной топологической структурой информационной распределительной сети, имеющих практическое значение, включает такие показатели, как [5, 9, 16]:

коэффициент информационно-технологической эффективности (рациональности использования информационного ресурса) узла (эргасистемы):

$$J_{1T} = \mathcal{E}_T / [\mathcal{E}_T + I_v(\Theta)], J_{1T} \in (0, 1);$$

информационная производительность: $J_{2T} = \mathcal{E}_T / \tau'$;

информационная надежность: $J_{3T} = \mathcal{E}_T / H(M_1)$, $J_{3T} \in (0, 1)$ (надежность равна единице в случае отсутствия дестабилизирующих факторов);

информационно-преобразующая способность: $J_{1U} = \mathcal{E}_U / \tau'$;

информационная добротность (характеризует экономичность эргасистемы): $J_{2U} = I / [I_v + I_z(T)] = [\mathcal{E}_U + I_o + I_v + I_z(T)] / [I_v + I_z(T)] = 1 + [\mathcal{E}_U + I_o] / [I_v + I_z(T)]$;

коэффициент информационного усиления (характеризует силу воздействия информационного узла, эргасистемы):

$$J_{3U} = I / \mathcal{E}_U = [\mathcal{E}_U + I_o + I_v + I_z(T)] / \mathcal{E}_U = 1 + [I_o + I_v + I_z(T)] / \mathcal{E}_U,$$

где $\mathcal{E}_T = H(M_1) - \sum_i p(m_{oi}) H(M_1 | m_{oi})$;

$H(M_1) = \sum_j p(m_{1j}) \ln p(m_{1j})$;

$H(M_1 | m_{oi}) = \sum_j p(m_{1j} | m_{oi}) \ln p(m_{1j} | m_{oi})$; $\mathcal{E}_U = \max | I_z(M, T_L) | = \max \sum_m | \ln [T_L(O_m) / T_L] |$, $m = 1, \dots, M$; $I_v(\Theta)$ – количество используемой структурной информации, содержащейся в информацион-

ном узле, определяющее затраты (информационные, материальные, энергетические) на преобразование содержательной информации; τ' – средний интервал времени между моментами формирования двух преобразованных ИМ $m_{1j}, m_{1(j+1)} \in M_1, j = 1, 2, \dots$; τ' – средний интервал времени переработки осведомляющей информации Q_o от одного СДО; I – общее количество информации, которое хранится и циркулирует в эргасистеме (узле); I_o – количество информации, хранимой в информационной базе эргасистемы (узла); m_o – ИМ-оригинал; L – номер выходного информационного узла управляющей подсистемы.

При этом определено, что степень глобальной информационно-технологической эффективности (ИТЭ) эргасистемы не превышает максимальной степени локальной ИТЭ подсистем (информационных узлов) эргасистемы при любых условиях, т.е. $J_{1T} \leq \max \{ J_{1Tl} \}$, $l = 1, \dots, L$, а степени глобальных информационно-технологических надежности и производительности эргасистемы определяются, главным образом, соответствующими локальными показателями выходной подсистемы (узла) при любых условиях, т.е. $J_{2T} \leq J_{2Tl}, J_{3T} \leq J_{3Tl}$ [15].

Условие *наблюдаемости* состоит в следующем: для того, чтобы СДО (в частности, подвижный, мобильный, летательный и др.) был наблюдаем по аппаратуре, необходимо и достаточно, чтобы

$$\text{rang} \parallel H \quad HC \quad HC^2 \quad \dots \quad HC^{l-1} \parallel^T = l, \quad (7)$$

где H, C – матрицы наблюдения и информационных связей, соответственно, т.е. чтобы агрегированная матрица размера $[kl \times l]$, $k \leq l$ имела максимальный ранг (при $y_i(t) = V, i = 1, \dots, l; V \in \{0, 1\}$).

Условие *управляемости* состоит в следующем: для того, чтобы СДО был эффективно (с точностью до порога различимости $d_s = |s_i - s_j|$) – метрика пространства состояний СДО $S = \{s_i\}, i = 1, \dots, n$, управляем (по аппаратуре и движению), необходимо и достаточно, чтобы

$$\max \{ I_o(S) \} > I_y(U) | d_s,$$

т.е. максимальное количество I_o осведомляющей (контрольно-измерительной) информации (о состоянии

⁴ Ловцов Д. А. Информационные показатели эффективности функционирования АСУ сложными динамическими объектами // Автоматика и телемеханика. 1994. № 12. С. 143–150; Ловцов Д. А. Информационные оценки технологической эффективности переработки информации // НТИ. Сер. 2. Информ. процессы и системы. 1997. № 11. С. 22–26.

$s_i \in S$ объекта управления), полученное от СДО, было строго больше количества I_y управляющей информации (об управляющем воздействии $u_j \in U$), которое можно сообщить СДО [15].

Система обоснованных информационно-статистических показателей (индексы цен, коэффициент роста, уровень и темп прироста, темпоральные индексы базисных и цепных структурных сдвигов в проектных расходах и др.) комплексного информационно-аналитического исследования и экономической экспертизы процессов создания, испытания и развития СДО *новой техники* позволяет оценить качество (размерность, структурированность, динамичность и др.) проектных инвестиций в промышленности, науке, производственной сфере экономики и др., следовательно, определить основные тенденции технической политики надсистемы. В частности, соответствующие оценки качества проектных инвестиций позволяют определить степень согласованности и взаимосвязи выделяемых финансовых средств и статей их расходов с задачами отраслей надсистемы, а также с долгосрочными планами их развития. Количественные показатели, обеспечивая требуемую детализацию представления расходов (вплоть до затрат на отдельные элементы проектов), выполняют роль взаимных связей между иерархическими уровнями статей бюджета надсистемы и служат средством контроля за целевым использованием финансовых ресурсов.

Разработанная система информационно-статистических показателей [16] обладает функциональной полнотой и приемлема для решения задач оптимизации финансово-экономического обеспечения мероприятий развития производства и повышения эффективности использования выделяемых проектных инвестиций. В концептуальной модели системы взаимной *ресурсной безопасности* ансамбль обоснованных информационно-статистических показателей целесообразно использовать на уровне организационно-технологического управления [17], направленного на удовлетворение совокупности производственных интересов каждой надсистемы в условиях сложившейся материально- и информационно-производственной организации, в частности, для сравнительного анализа проектных расходов конкурирующих надсистем на оборону.

4. Теоретические положения синтеза и оптимизации информационных процессов в эргасистеме

Включают методологические положения предметной области ситуационного планирования (в подсистеме P_3) ТППИ в иерархической сети эргасистемы (определения, декомпозиция проблемы, концептуальные утверждения); математическую модель проблемной ситуации принятия решений по планированию ТППИ в иерархической сети эргасистемы; *методику* разработки, состав и структуру (внутреннюю организацию),

научные методы, технологию и средства применения (в сети эргасистемы) ИМО упорядочения и распределения экзогенного ресурса и ЗПИ, выбора, коррекции и координации решений периферийных элементов (ПЭ) сети эргасистемы; метод тест-динамической оптимизации ситуационного упорядочения ЗПИ; метод распределенной телепереработки осведомляющей (контрольно-измерительной) информации в иерархической сети эргасистемы, применение которых в совокупности позволяет разработать и внедрить ИМО, дающее существенный выигрыш (30–60%) во времени выполнения технологического процесса полной иерархической переработки измерительной информации относительно децентрализованной или централизованной переработок [15].

Математически задача ситуационного планирования и координации (СПК) ТППИ в иерархической сети эргасистемы (рис. 5) формулируется как задача составления оперативного парето-оптимального плана ($W^* \in \Delta$) использования имеющихся средств ($S = \{s_l\}$, $l = 1, \dots, L$) автоматизации и ресурсов ($R = \{r_k\}$, $k = 1, \dots, K$), который обеспечивает экстремальное значение заданному глобальному показателю быстродействия $F_o(W^*, \omega) = \min[D(W, \omega)]$, $\omega \in \Omega$ (где D – директивный срок) при выполнении специфических ограничений, определяющих допустимость плана W^* , и классифицирована как сложная оптимизационная задача иерархического многоэтапного стохастического программирования (поскольку решение задачи разнесено в пространстве и во времени и принимается в условиях возмущающих воздействий ω) комбинаторного типа, декомпозируемая на:

- две математические взаимосвязанные оптимизационные подзадачи упорядочения и разбиения ЗПИ $A^{(p)} = \{a_i\}$, $i = 1, \dots, N_p$ по эшелонам иерархии сети эргасистемы;

- математическую оптимизационную подзадачу координации решений-расписаний

$$W_x^*: A^{(p)} \longrightarrow \{0, 1, \dots, [D_{\min}^{(p)} - 1]\}, p = 1, \dots, m, x = 1, \dots, n$$

периферийных элементов эргасистемы, сопоставляющих i -й ЗПИ время $t_i^{(w)} = \{0, 1, 2, \dots\}$ её начала;

- логико-лингвистическую подзадачу оперативной математической формулировки данных трёх оптимизационных подзадач.

Математическая модель проблемной ситуации принятия организационно-технических решений ($W = \langle W_1, \dots, W_n \rangle$, где W – вариант распределения ЗПИ) n периферийными элементами по планированию многофазной (Φ_i , $i = 1, \dots, n$) переработки информации в иерархической сети эргасистемы, в структуру которой с целью адекватного отражения реальных процессов СПК введены координирующие сигналы ($W^o = \langle W^o_1, W^o_2, \dots, W^o_n \rangle$, где W^o – экзогенный аппаратно-программный ресурс, выделяемый периферийным элементам) центрального элемента управления, содержит алгоритм, предусматривающий итерационный процесс выбора пары, содержащей:

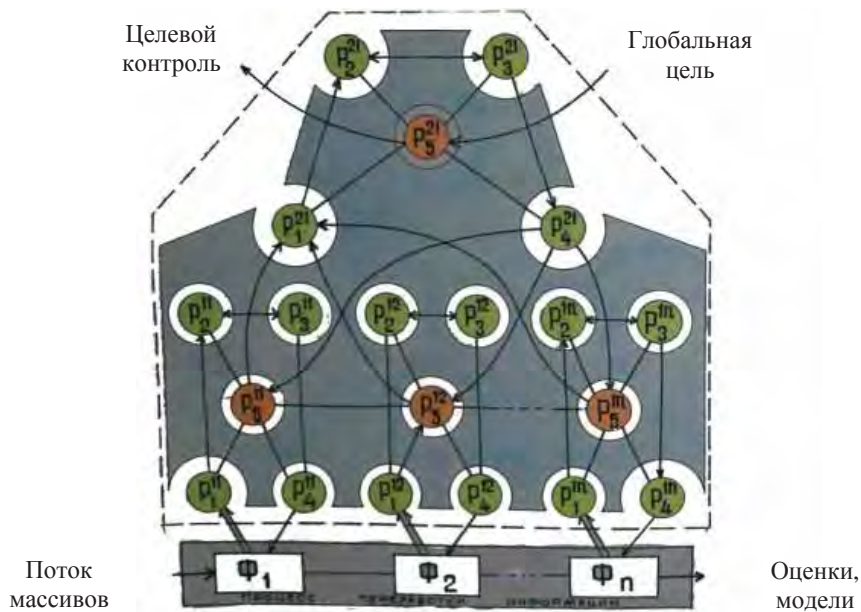


Рис. 5. Двухуровневая иерархическая функциональная структура информационно-распределительной сети эргосистемы

1) оптимальное решение

$$W^*(W^0, \omega) = \langle \underset{W_1 \in \Delta_1^*(W^0_1, \omega_1)}{\text{Argmin}} F_1(W_1), \underset{W_2 \in \Delta_2^*(W^0_2, \omega_2)}{\text{Argmin}} F_2(W_2), \dots, \underset{W_n \in \Delta_n^*(W^0_n, \omega_n)}{\text{Argmin}} F_n(W_n) \rangle,$$

где F_x – локальная (для периферийного элемента) целевая функция (ЛЦФ); α, β – ограничения множеств Δ_x допустимых решений, задаваемые функционально-операторными или аксиоматическими способами и

путем введения графовой или логико-алгебраической структуры, соответственно;

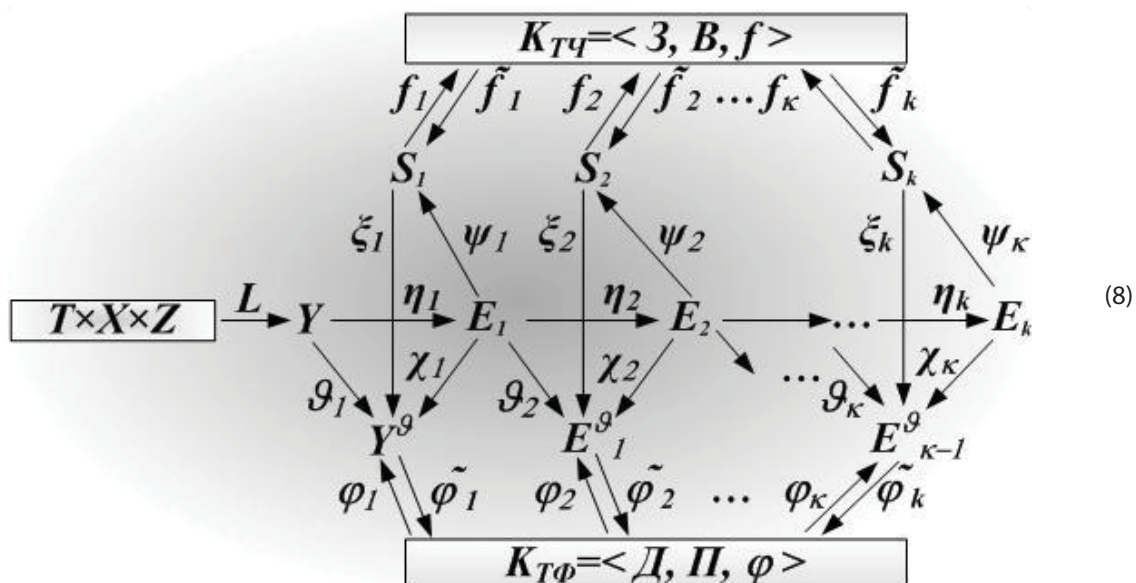
$$\Delta_x^*(W^0_x, \omega_x) = \{ W_x | \langle W_x \rangle \in \Delta_x^0 \times \Delta_{\alpha\beta}, W_x \in \Delta_{\alpha\beta}(\omega_x) \}, x=1, \dots, n;$$

2) оптимальный (рациональный) координирующий сигнал

$$W^{0*} = \underset{W^0 \in \Delta^{0*}(\omega)}{\text{Argmin}} F_0[W(W^0), \omega] = \underset{W^0 \in \Delta^{0*}(\omega)}{\text{Argmin}} F_0\{W^0(\lambda), F_x, \omega\}, x=1, \dots, n.$$

Решение многокритериальной подзадачи координации (поиска W^{0*} осуществляется способом агрегирования (свертки) ЛЦФ с учетом приоритетных (весовых) коэффициентов $\lambda_x \geq 0, \sum_x \lambda_x = 1, x=1, \dots, n$

объектов управления (периферийных элементов), правил предпочтения целевых функций и закона изменения этих правил [15].



Метод⁵ распределенной переработки телеметрической (контрольно-измерительной) информации (ТМИ) в иерархической сети эргасистемы (как специальный метод целочисленного динамического программирования, объединяющий идеи прямых методов последовательного сужения множества альтернатив и непрямых методов, ориентированных на задачу) базируется на представлении процесса выработки и принятия решения о виде технического состояния СДО в эргасистеме с помощью математической структуры многоуровневого функционально-технического диагностирования (8) [7]:

где T – множество моментов времени, в которые наблюдается СДО; X, Y – множества входных и выходных сигналов СДО, соответственно; Z – множество состояний СДО; $E_i, S_i, i = 1, \dots, K$ – множества заданных и истинных видов технических состояний подсистем СДО на i -й страте описания; Y^g, E_i^g – фактор-множества $Y, E_i; K_{Tч}$ – тезаурус, содержащий *неформализованный* образ СДО как информационной системы; Z – множество знаний (информация) о СДО, которым располагает коллектив лиц, принимающих решения (ЛПР) по управлению СДО на всех стадиях «жизненного цикла»; B – множество вопросов, формулируемых при принятии решений; f – отображение экспликации, ставящее каждому вопросу $b \in B$ ответ из Z ; $K_{Tф}$ – тезаурус-классификатор, содержащий *формализованный* образ СДО как информационной системы; D – множество документов, описывающих СДО; Π – множество проверок, реализуемых для определения технического состояния объекта; φ – отображение сопоставления, ставящее в соответствие каждой проверке $\pi \in \Pi$ ответ из D ; L – отображение наблюдения; $\eta_i, \nu_i, \chi_i, \psi_i, \xi_i, f_i, \Phi_i, i = 1, \dots, K$ – отображения многоуровневого классифицирования, факторизации, импликации, оценивания, идентификации, экспликации и сопоставления на i -м слое принятия решения, соответственно; $f_i, \Phi_i, i = 1, \dots, K$ – отображения обратной экспликации и обратного сопоставления, соответственно.

Суть метода состоит в том, что общая задача переработки ТМИ представляется графом информационно связанных ЗПИ-алгоритмов диагностирования, наиболее оперативное и экономичное (при обеспечении требуемых уровней достоверности и глубины переработки ТМИ) выполнение которых возможно в децентрализованном режиме с учётом предварительного ситуационного распределения ЗПИ между узлами распределительной сети эргасистемы.

Метод⁶ тест-динамической оптимизации ситуационного упорядочения ЗПИ во времени (как модифицированный метод последовательного сужения множества целочисленных альтернатив), основанный на идеях

методов анализа критических путей, динамического программирования и применении специальных алгоритмов-ограничителей (тестов), использующих информацию о длительностях ($\tau_i, i = 1, \dots, N_p$) и отношении (\prec) предшествования ЗПИ (тест-1) и о потребностях ЗПИ в ресурсах ($r_i = \{r_i^{(k)}, k = 1, \dots, K\}$) (тест-2), позволяет вырабатывать оптимальные ситуационные решения-расписания

$$W^* = W(D_{\min}) = \underset{W \in \Delta_{\alpha\beta}}{\text{Argmin}} F(W) = \underset{1 \leq i \leq N}{\text{Argmin}} [\max\{t_i^{(iv)} + \tau_i\}]$$

выполнения ЗПИ на основе рационального использования машинных ресурсов КСА.

Реализация метода предполагает начальный выбор ЛПР наименьшего значения директивного срока $D_{\min} \in [D_o, D_{Y^*}]$ и машинный поиск хотя бы одного оптимального расписания $W^* = W(D_{\min})$, соответствующего кратчайшему пути на дополнительном ациклическом ориентированном графе $G' = (A' = \{\theta_{00}, \theta_{1k}, \theta_{2m}, \theta_{3n}, \dots, \theta_{\mu z}, \dots, \theta_{MZ}\}; B' \in A' \times A')$, описывающем частный порядок в обобщенном ТППИ и однозначно определяемом исходным графом ЗПИ $G = [A^{(p)}, B]$ (см. (4)).

В процессе поиска W^* исключаются из рассмотрения комбинаторные альтернативы

$\theta_{\mu z}, \mu = 1, \dots, M; z = 1, \dots, Z$ (где μ – номер этапа поиска, z – номер альтернативы), не удовлетворяющие специальным условиям теста-1 и теста-2, соответственно (что существенно уменьшает размер G'):

$C_\mu \subseteq \theta_{\mu z}$ (условие наличия в $\theta_{\mu z}$ необходимого множества C_μ альтернатив-предшественников);

$$R^{(k)}(\theta_{\mu z}) \geq R^{(k)}_{\mu \min}, R^{(k)}_{\mu \min} = \max\{0, [R^{(k)} - (D - \mu)r_o^{(k)}]\}, k = 1, \dots, K$$

(условие наличия необходимого для $\theta_{\mu z}$ количества ресурсов k -го вида), а также за счёт объединения процесса поиска с процессом динамического программирования, функциональное уравнение которого имеет вид:

$$T_\mu(q) = \min_{\theta_{z'} \in Z_{\mu-1}} \{ \min_{\theta_z \in Z_\mu} [\delta_{z'q} + T_{\mu-1}(z')]; \min_{\theta_{z''} \in Z_\mu} [\delta_{z''q} + T_{\mu-1}(z'')] \},$$

где $T_\mu(q)$ – длина кратчайшего пути из θ_o в θ_q , сформированную на μ -м этапе; Z_μ – множество θ_z μ -го этапа, которые могут принадлежать кратчайшему пути θ_o в θ_z ; e – номер первой по порядку вершины-альтернативы ($\mu-1$ -го этапа); v – номер альтернативы-родителя вершины q ; g – номер первой альтернативы μ -го этапа; θ_z – потенциальная альтернатива, от которой можно перейти к θ_q ; $\delta_{zq} = 1$ – если переход из θ_z в θ_q существует; $\delta_{zq} = \infty$ – в противном случае; $e \leq z' \leq v, g \leq z'' \leq q$.

Оперативный выбор минимальной директивной длительности ТППИ $D_{\min} \in [D_o, D_{Y^*}]$, при которой по алгоритму оптимального упорядочения ЗПИ выполняется машинный поиск оптимального расписания $W^* = W(D_{\min})$, а также – в случае отсутствия $W(D_{\min})$ – коррекция D_{\min} осуществляются по алгоритму, использующему рекуррентный ряд Фибоначчи (рекуррентная последовательность целых чисел Φ_n), задаваемый равенствами [15]:

$$\Phi_o = \Phi_1 = 1; \Phi_n = \Phi_{n-1} + \Phi_{n-2}, n = 2, 3, \dots$$

Основные соотношения, характеризующие алгоритм, имеют вид:

⁵ Лобан А. В., Ловцов Д. А. Метод распределенной переработки телеметрической информации от сложных динамических объектов // Автоматика и телемеханика. 1995. № 5. С. 150–160.

⁶ Ловцов Д. А. Ситуационное планирование процесса переработки измерительной информации в сети АСУ // Изв. РАН. Теория и системы управления. 1995. № 5. С. 239–247.

$$L_{\kappa-1} = L_{\kappa} + L_{\kappa+1}, \kappa = 2, \dots, n-1; L_{\kappa} = \Phi_{n-\kappa+1}, \\ \kappa = 1, \dots, n-1; \\ \pi_1(\kappa) = \pi_{\text{л}} + (\pi_{\text{п}} - \pi_{\text{л}})L_{\kappa+2}/L_{\kappa}; \quad \pi_2(\kappa) = \\ = \pi_{\text{л}} + (\pi_{\text{п}} - \pi_{\text{л}})L_{\kappa+1}/L_{\kappa},$$

где L – интервал неопределенности, содержащий D_{\min} ; κ , $n-1$ – номер и число итераций выбора, соответственно; Φ – число Фибоначчи; $\pi_1(\kappa)$, $\pi_2(\kappa)$ – левая и правая симметричные точки интервала L_{κ} , в которых проверяется существование расписания W , соответственно; $\pi_{\text{л}}$, $\pi_{\text{п}}$ – левая и правая границы интервалов неопределенности, соответственно.

5. Теоретические положения синтеза и оптимизации информационной базы эргасистемы

Включают методологические положения предметной области построения и ведения проблемно-ориентированной информационной базы эргасистемы (понятийный аппарат, принципы НИТ, базисная информационно-функциональная структура [11], методологические требования); методологическую диаграмму и методику диагностического обследования, анализа и разработки баз данных и знаний (БДЗ) функциональных подсистем (ФПС) P_1-P_7 (см. рис. 4) реальных эргасистем; методику разработки, состав и структуру (внутреннюю организацию), научные методы, технологию и средства применения ИМО синтеза БДЗ и тезаурусов; поиска, интерпретации информации и реорганизации БДЗ; специализированные БДЗ как информационно-математические модели ФПС и вложенные фреймовые логико-лингвистические модели (тезаурусы) информационных процессов СПК ТППИ в сети эргасистемы, ситуационного функционального контроля (СФК) состояния бортовой аппаратуры СДО, ситуационного планирования натурных экспериментов с образцами СДО и прогнозирования результатов навигационных определений (СПНО); метод робастного СФК состояния СДО на основе НИТ, применение которых позволяет разработать и внедрить специальные НИТ СПК ТППИ, СФК СДО, СПНО СДО в эргасистеме, обеспечивающие значительное сокращение трудозатрат на разработку и сопровождение специального информационно-программного обеспечения соответствующих ФПС и обучение персонала.

Формализованное представление знаний Φ_Q о процессах функционирования СДО должно отвечать следующим практическим требованиям:

интегрированности массивов M контрольно-измерительной информации (КИИ) о текущих алгоритмах управления A_y и значениях навигационных параметров $N(T)$ на интервале T наблюдения функционирования СДО, т. е.:

$$\Phi_Q: \{M[A_y(T)], M[N(T)]\} \longrightarrow \\ \{Q[Y_{\text{п}}(T) \leftrightarrow Y_{\text{н}}(T)], Q[Y_D(T)]\},$$

где $\{Q[Y_{\text{п}}(T) \leftrightarrow Y_{\text{н}}(T)]\}$ – знания (информация), позволяющие проверить по КИИ соответствие наблюдаемых процессов $Y_{\text{н}}(T)$ процессам $Y_{\text{п}}(T)$ правильного функ-

ционирования СДО; $Q[Y_D(T)]$ – знания, позволяющие получить оценку проявляющегося дестабилизирующего фактора (ДФ) $\delta \in D(T)$, нарушающего соответствие процессов $Y_{\text{н}}(T)$ и $Y_{\text{п}}(T)$;

инвариантности к различным СДО, т. е.:

$$A_i(\Phi_{Q_i}) = A_j(\Phi_{Q_j}) \mid i, j = 1, \dots, m; \quad i \neq j,$$

где m – количество различных СДО, обслуживаемых Φ_Q ; A_i, A_j – множества алгоритмов применения знаний для выполнения специальной задачи эргасистемы при управлении i -м и j -м СДО, соответственно;

интеллектуальности, т. е. быть обеспеченным интеллектуальным интерфейсом, который позволял бы операторам-парапрограммистам пополнять и уточнять $Q(Y_{\text{п}} \leftrightarrow Y_{\text{н}})$ и $Q(Y_D)$ на различных этапах «жизненного цикла» СДО: наземные ($T_{\text{н}}$) и лётные ($T_{\text{л}}$) испытания, штатная эксплуатация ($T_{\text{ш}}$) и др.:

$$E(\Phi_Q): \{Q''[Y_{\text{п}}(T) \leftrightarrow Y_{\text{н}}(T)], Q''[Y_D(T)]\} \longrightarrow \\ \{Q'[Y_{\text{п}}(T) \leftrightarrow Y_{\text{н}}(T)], Q'[Y_D(T)]\},$$

где $E(\Phi_Q)$ – интеллектуальный интерфейс, позволяющий оператору управляющей подсистемы осуществлять отображение неполных и неточных знаний (два штриха) в более полные и точные (один штрих); $T \subseteq \{T_{\text{н}}, T_{\text{л}}, T_{\text{ш}}\}$.

Специализированные БДЗ (как информационно-математические модели автоматизированных подсистем P_5, P_2, P_3 (см. рис. 4): координации и планирования ТППИ, функционально-технического диагностирования, навигационных определений СДО, соответственно, обеспечивающие внедрение специальных НИТ) в качестве основных элементов содержат *фреймовые*⁷ логико-лингвистические модели (включающие концептуальные структурные фреймы-прототипы (рис. 6), фреймы-образцы (рис. 7) и фрейм-сценарии как форму представления фреймовых описаний диалоговых процедур [15]) информационных процессов, предназначенные для переработки лингвистических данных и обеспечивающие реализацию диалоговых человеко-машинных процедур, оперативное выполнение информационных процессов ситуационного планирования и контроля СДО, хранение обобщенной (текущей, ретроспективной и др.) информации о технологии процессов, реализацию системного принципа непрерывного развития ИМО; продукционные правила, рациональные стратегии и соответствующие комплексы эффективных алгоритмов оперативной выработки центральным и периферийными элементами эргасистемы рациональных (оптимальных) управляющих организационно-технических решений; методические принципы программной реализации фреймовых моделей.

Метод⁸ робастного (стабильного, т. е. не чувствительного к незначительному или частичному искаже-

⁷ См.: Minskiy M. Framework for Representing Knowledge // Psychology of Computer Vision. McGraw-Hill: P. H. Winston, 1975; Кузин Л. Т. Основы кибернетики: В 2-х т. Т. 1. Математические основы кибернетики. М.: Энергия, 1973. 502 с. Т. 2. Основы кибернетических моделей. М.: Энергия, 1979. 584 с.

⁸ Ловцов Д. А., Калашников Ю. В. Информационная технология автоматизированного ситуационного функционального контроля

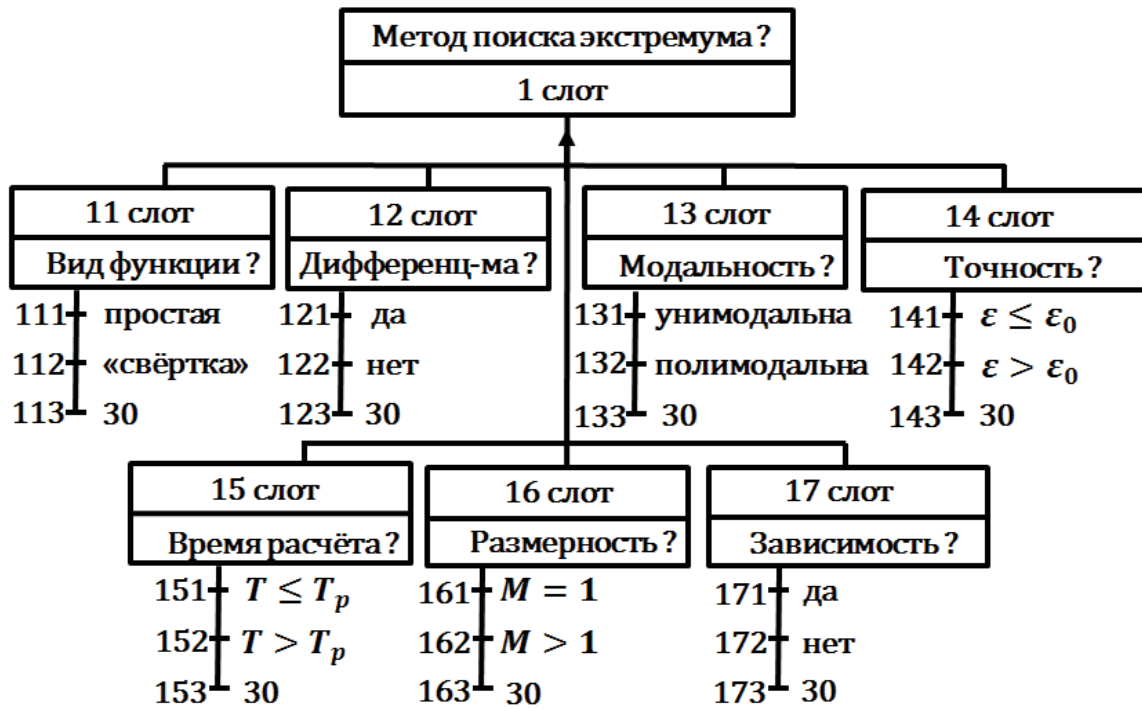


Рис. 6. Концептуальная структура фрейма-прототипа «Метод поиска экстремума» целевой функции («30 – задание отсутствует»)

нию КИИ) ситуационного функционального контроля состояния управляемого СДО (как специальный метод стохастического программирования, ориентированный на задачу) основан на том, что первоначально полагается, что СДО будет правильно функционировать на интервале наблюдения T . Поэтому для проверки правильности изменения параметров $r_{xj} \in R_x, j=1$ текущих на T процессов $Y_x, x=1, \dots, x_T$, функционирования СДО используются соответствующие критерии $\{K_{xjn}, K_{xjp}, K_{xjk}\}$, характеризующие правильность начального состояния Y_x по r_{xj} на T , правильность протекания и правильность конечного состояния Y_x соответственно.

Если в какой-либо момент времени на T обнаруживается ситуация, похожая на рассогласование, или неопределенное состояние процесса (процессов), то предполагается возможность проявления ДФ и осуществляется проверка наличия распространения этого проявления из-за причинно-следственных связей на другие процессы функционирования. Если такая проверка подтверждает факт распространения, то принимается решение о проявлении ДФ и оператору выдаются рекомендации U_G по управлению в соответствии с текущей ситуацией функционирования СДО, в противном случае обнаруженная возможность проявления ДФ оценивается как искажение КИИ помехами.

Проверка наличия распространения проявления ДФ осуществляется по наиболее «оперативным» причинно-следственным связям, укладывающимся по времени в некоторый интервал, оставляющий

оператору достаточно времени для своевременного реагирования (обеспечивается реальный масштаб времени выработки рекомендаций U_G по управлению СДО).

Правило получения результата СФК по рациональной стратегии W^* выражается формулой:

$$S_{xji} = \begin{cases} \mathbf{1}, @ S_{kxji} = \mathbf{1} \wedge \{S_{0xji}, S_{1xji}, \dots, S_{(k-1)xji}\} \longrightarrow \\ \longrightarrow \{\delta, H\} \wedge (\tau_{1xj} + \tau_{2xj} + \dots + \tau_{kxj} \leq \Delta\tau_x), \\ \delta(k), @ S_{kxji} = \delta \wedge [S_{lxji} = H \mid l (l \geq k+1) \wedge \\ \wedge (\tau_{1xj} + \tau_{2xj} + \dots + \tau_{kxj} \leq \Delta\tau_x)], \end{cases}$$

где S_{xji} – уточненный по продукционным правилам за интервал $\Delta\tau_x$ результат СФК параметра r_{xj} на момент t_i ; $\mathbf{1}$ – подтверждение правильности Y_x ; $\delta(k)$ – определение ДФ в результате последнего уточнения S_{xji} , полученного на $\Delta\tau_x$ и не равного H (k характеризует достигнутую вероятность получения точной оценки $S_{xji} = \delta$); S_{kxji} – результат СФК r_{xj} , уточненный по продукционным правилам с использованием результатов СФК параметров k -го уровня процессов-следствий; \wedge – знак логического «И».

Фреймовая логико-лингвистическая модель диалогового процесса оперативной математической формулировки задач СПК ТППИ содержит типовые структуры (фрейм-сценарии) формирования ситуационных исходных множеств $A_x^{(p)}, S, R, \Delta_{x\alpha\beta}, \Delta^{o*}, x=1, \dots, n$; построения главной целевой функции (ГЦФ) $F_o(W, \omega)$; выбора численного метода оптимизации и др. Для реализации двух последних процедур используются кон-

сложных динамических объектов // НТИ. Сер. 2. Информ. процессы и системы. 1997. № 2. С. 21–28; № 3. С. 18–26.

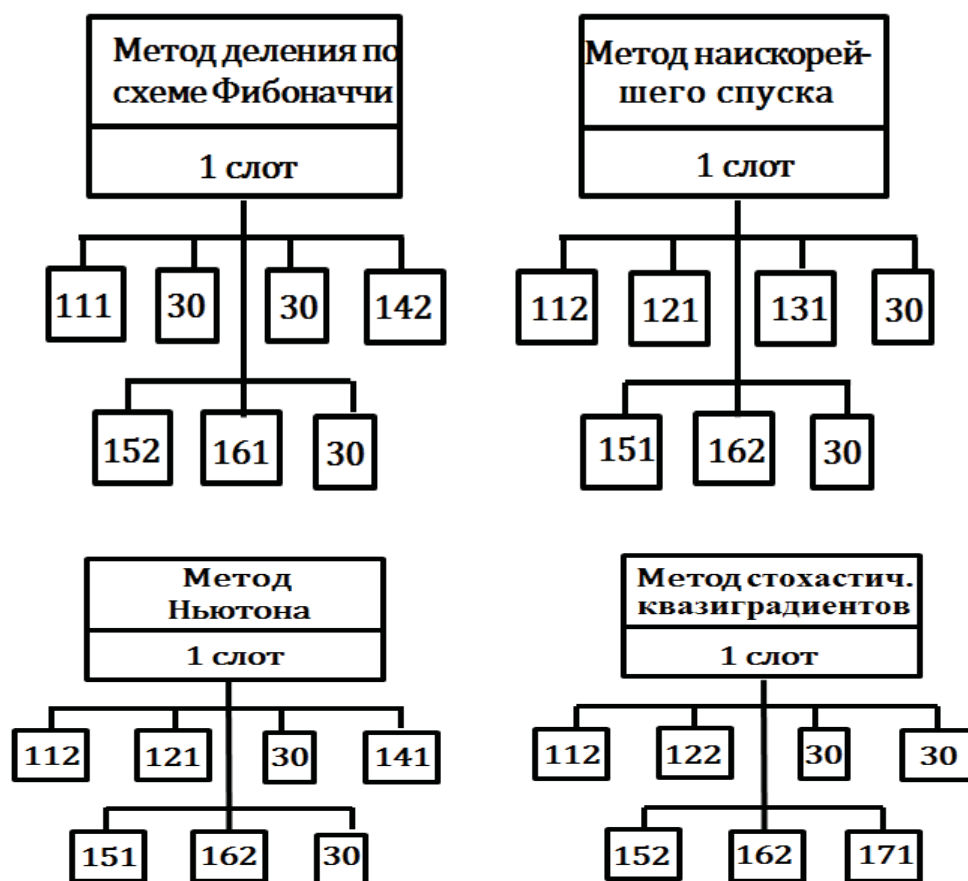


Рис. 7. Фреймы-образцы численных методов оптимизации

цептуальные многоуровневые фреймы в виде графов «и/или/или, и/или», «и/или», соответственно. Терминалы фреймов отождествлены с характерными вопросами-заданиями, предлагаемыми ЛПР, в частности, относительно:

- количества, однородности, взаимозависимости, необходимости нормализации ЛЦФ, наличия и значений приоритетно-весовых показателей и коэффициентов и др. – при построении ГЦФ;

- вида, дифференцируемости, унимодальности целевой функции, размерности и зависимости аргументов, допустимой погрешности и времени расчета и др. – при выборе численного метода оптимизации (см. рис. 6, 7).

Структура *фреймовой модели* предметной области контроля функционирования СДО представляется в виде⁹:

$\Phi_o := \{\Phi_A[\Phi_U(\Phi^1_U, \Phi^2_U)], \Phi_S(\Phi_P \vee \Phi_R), D(D_T, D_C)\}$,
 где Φ_A – фрейм-прототип, описывающий алгоритм управления бортовой подсистемой СДО; Φ_U – атрибут имени экземпляра фрейма совершаемого процесса, порождаемого управляющим воздействием U ; Φ^1_U, Φ^2_U – атрибуты имен экземпляров субфреймов, под-

тверждающего выдачу U и определяющего правильную обработку U , соответственно; Φ_S – атрибут имени экземпляра фрейма поддерживаемого процесса; Φ_P, Φ_R – атрибуты имен экземпляров фреймов повторяемого и регулируемого процессов, соответственно; D – фрейм-прототип, представляющий знания о неправильно протекающих процессах в СДО по причине проявления $D\Phi \delta$; D_T – атрибут имени фрейма, описывающего распространение проявления δ во времени в виде появления рассогласований процессов на выходах различных функциональных элементов из-за причинно-следственных связей в логической модели функционирования СДО; D_C – атрибут имени фрейма, описывающего установившиеся процессы на выходах различных элементов из-за проявления δ .

Фреймовая *информационно-энтропийная модель* подсистемы навигационных измерений включает, в частности, структурированную совокупность фреймов, описывающих состав управляемых СДО одного класса; множества K^o требуемых значений показателей качества СДО, математических зависимостей ситуационных информационных условий наблюдаемости и управляемости процесса экспериментальной отработки СДО, типовых траекторий движения СДО, штатных вариантов применения информационных средств на участках траекторий движения СДО, наблюдаемых параметров

⁹ Ловцов Д. А., Калашников Ю. В. Информационная технология авто-матизированного ситуационного функционального контроля сложных динамических объектов // НТИ. Сер. 2. Информ. процессы и системы. 1997. № 2. С. 21–28; № 3. С. 18–26.

СДО; фрейм-сценарий группирования и отбора наиболее информативных параметров и формирования базовых множеств задачи натурной (экспериментальной) отработки СДО; многоуровневый структурный фрейм-прототип «ДИЭ» в виде графа, фиксирующего общее продукционное правило «и/или/и», с присоединенной диалоговой процедурой выбора рациональной (экспоненциальной, логистической или др.) зависимости динамики изменения апостериорной энтропии (ДИЭ) на интервале $T = \sum_n t_n$, $n = 1, \dots, N$; комплекс фреймов-образцов математических моделей ДИЭ в виде¹⁰: $H_n(K \subseteq K^0) = H_n(t, \lambda, H_n, H_k, H_o, p_1, p_2)$, $n = 1, \dots, N$, где $\lambda = A/T$ – производительность выполнения множества $\{A\}$ доработок в течение времени T проведения n этапов, необходимых для устранения несоответствий в состоянии СДО и достижения допустимой $H_n(K \subseteq K^0)$; H_n – значение энтропии $K \subseteq K^0$ перед началом n -го этапа испытаний; H_o – минимальное значение энтропии, предельно достижимое на n -м этапе и обусловленное технологией натурной отработки СДО; H_k – априорная энтропия соответствия контролируемого параметра допуску (характеризующая разброс или степень отработанности параметра); p_1, p_2 – вероятности ошибок контроля первого и второго рода, соответственно.

Модель позволяет прогнозировать многоэтапный процесс отработки СДО как уменьшение текущего значения $H_n(t)$, $n = 1, \dots, N$ для обоснованного определения требований к информационно-разрешающей способности H_o измерительного комплекса. При этом используется *информационный критерий* регулирования процесса отработки СДО:

$$I_v(\theta) = \sum_{j=1}^{n_\phi} \sum_{i=1}^{n_e-1} \ln(t_{ij}/\tau_{ij}) \leq I_v^o,$$

где n_ϕ – количество СДО, обрабатываемых по этапам комплексной программы (фиксированной структуры, т. е. $G = \emptyset$; см. (4)), определяющее мощность множества Φ отображений (каждому СДО соответствует один элемент $\phi \in \Phi$); n_e – количество «контрольных событий» (завершения и начала смежных этапов) отработки СДО (как полное множество E составляющих систему отработки элементов); t_{ij} – величина возможного временного диапазона выполнения i -го этапа отработки j -го СДО, соответствующая интенсивности Λ связи между i -м и $(i+1)$ -м элементами-событиями; τ_{ij} – величина погрешности определения времени наступления «контрольного события», соответствующая абсолютной погрешности e_c ; $I_v(\theta)$ – общее количество информации о прохождении n СДО этапов («контрольных событий») комплексной программы отработки; I_v^o – заданное максимально допустимое значение используемого информационного ресурса рассматриваемой системы от-

работки СДО; t_i / τ_i – оценка качества выполнения i -го этапа отработки СДО, показывающая в какой степени значение времени выполнения этапа оказалось уточненным в результате его реализации по сравнению со сведениями, которые имелись об этом значении перед началом выполнения i -го этапа; $\ln(t_i/\tau_i) = I_{ci}$ – количество информации для одной связи между i -м и $(i+1)$ -м событиями, интерпретируемое как количество информации, получаемое в подсистеме P_5 (см. рис. 4) координации в результате получения оперативного доклада о времени завершения i -го этапа отработки СДО.

6. Теоретические положения синтеза и оптимизации подсистемы контроля и защиты информации в эргасистеме

Включают *методологические положения* предметной области обеспечения защищенности (достоверности, сохранности, конфиденциальности) циркулирующей в эргасистеме информации (понятийный аппарат, системообразующая концепция гарантированного обеспечения защищенности информации в эргасистеме; парадигма, направления обеспечения и агрегированная модель информационной безопасности эргасистемы, модель человека-оператора как информационного деятеля-личности, концептуальные утверждения); *формально-математический аппарат* и метод синтеза рациональной подсистемы контроля и защиты перерабатываемой формализованной информации, метод ситуационного планирования и прогнозирования процессов обмена привилегированной информацией в неоднородной стационарно-мобильной сети эргасистемы; функционально достаточно полный комплекс эффективных алгоритмов обеспечения защищенности информации и аутентификации функциональных объектов эргасистемы; метод скрытного телеконтроля бортовых подсистем СДО, *применение* которых позволяет разработать и внедрить новую технологию контроля и защиты информации в эргасистеме, обеспечивающую требуемый уровень защищенности информации при значительном сокращении трудозатрат на подготовку и реализацию информационного обмена [8, 9, 12, 14, 17].

Исходное концептуальное *утверждение* состоит в том, что достоверность информации в эргасистеме с последовательной структурой ТППИ и контролем в каждом узле по принципу обратной связи повышается при переносе концов обратной связи назад (влево, вверх) по информационной цепи технологических операций.

Метод¹¹ ситуационного планирования и прогнозирования процессов обмена привилегированной информацией в неоднородной стационарно-мобильной сети эргасистемы (как метод целочисленного про-

¹⁰ Ловцов Д. А., Панюков И. И. Информационная технология автомата-тизированного планирования определения навигационных параметров объектов ракетной техники // Автоматика и телемеханика. 1995. № 12. С. 32–46.

¹¹ Князев В. В., Ловцов Д. А. Ситуационное планирование защищенной переработки информации в АСУ испытаниями сложных динамических объектов // Автоматика и Телемеханика. 1998. № 9. С. 166–181; Ловцов Д. А. Защита информации в информационно-вычислительной сети // НТИ. Сер. 2. Информ. процессы и системы. 1997. № 1. С. 7–12.

граммирования, жестко ориентированный на структуру задачи) реализуется комплексом эффективных алгоритмов (включающим алгоритм циклического дискретного возведения в квадрат в модульной арифметике для быстрого преобразования ИМ на средствах ЭВТ), позволяющим максимизировать показатель $S = 10 \lg(L/TL_0)$, ΔB , практической стойкости (как характеристику усложнения обратных преобразований L , реализующих наилучший известный метод криптоанализа, по отношению к прямым преобразованиям или к порогу $L_0 \approx 10^{25}$ бит/с производительности современных ЭВМ, для интервала T времени).

Метод использует рекуррентные преобразования больших чисел-элементов ИМ с учетом выявленного соотношения: значение k -й степени целого положительного числа в модульной арифметике равно остатку по модулю произведения числа и значения его $(k-1)$ -й степени в модульной арифметике, т. е. [11]:

$$M_k = M^k \bmod N = (M_{k-1}M) \bmod N,$$

где $M_{k-1} = M^{k-1} \bmod N$; $N, k > 0$ – целые числа; $1 < M < N$.

Метод¹² скрытого автоматизированного телеконтроля функционального состояния бортовых подсистем СДО (как метод булевого стохастического программирования) основан на применении функционально достаточно полного комплекса алгоритмов выполнения (решения) частных задач телеконтроля и использовании информационного условия наблюдаемости в виде (7).

Решение задачи эффективного (достоверного, скрытого, оперативного) телеконтроля при уменьшении материальных и энергетических затрат на его реализацию состоит в повышении адаптивности телеконтроля к реально возникающим ситуациям на СДО и во внешней среде его функционирования, а также в применении автоматизированных структурно-семантических преобразований ТМИ с последующим анализом (структурным, сравнительным, статистическим и др.) в пункте телеконтроля полученных от СДО сообщений. Сущность преобразований ТМИ заключается в определении (с помощью дифференцирования потенциально-импульсных функций алгебры логики) минимально-необходимого числа обобщенных наблю-

даемых параметров, характеризующих работоспособность подсистем СДО, образованной функционально-связанными приборами.

7. Комплекс эффективных алгоритмов из состава ИМО информационных технологий СПК, СФК, СПНО, КЗИ

Включает технологии активной защиты: с применением «информационного» и «организационного» оружия [17], позволяет принимать оперативные и обоснованные управляющие организационно-технические решения при управлении СДО и их натурной отработкой с учетом меняющейся обстановки на основе рационального использования ресурсов автоматизированного имитационно-моделирующего комплекса на базе штатных средств эргасистемы [2, 3, 5, 7, 14, 15, 17, 21].

Заключение

Разработанные основы информационной теории эргасистем, в целом обобщающие и развивающие результаты общей информационной теории кибернетических систем и общей теории эргасистем, представляют собой совокупность методологических и теоретических положений о принципах и структурах, логической организации (технологии), системе способов и методик (методов и показателей), комплексе формально-математических средств информационного описания, представления, синтеза и оптимизации интегрированной эргасистемы.

Положения ИТ эргасистем представляют практическую значимость при решении задач оперативного планирования и автоматизированного управления СДО и натурной отработкой СДО новой техники. Разработанные алгоритмы из состава ИМО эргасистемы имеют форму функционально законченных модулей, методологически, организационно и программно (на штатных ЭВМ) согласованных между собой, и позволяют оперативно вырабатывать качественные ситуационные решения задач планирования и координации процессов защищенной переработки КИИ в сети эргасистемы, функционально-технического контроля и диагностирования СДО, планирования определения навигационных параметров образцов СДО в ходе натурной отработки и др.

¹² Ловцов Д. А., Бурый А. С. Телеметрическая система со сжатием массива информации: Патент на изобретение RUS 1425754 РФ // Б. И. 1988. № 35. С. 243.

Рецензент: **Бетанов Владимир Вадимович**, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент Российской академии ракетных и артиллерийских наук, начальник центра АО «Российские космические системы», г. Москва, Россия.

E-mail: vlavab@mail.ru

Литература

1. Бетанов В. В., Ларин В. К., Тюлин А. Е. Системный подход к решению задач информационного обеспечения управления КА. М. : Радиотехника, 2018. 252 с.
2. Бурый А. С. Отказоустойчивые распределенные системы переработки информации : монография. М. : Горячая линия – Телеком, 2016. 128 с.

3. Бурый А. С., Сухов А. В. Оптимальное управление сложным техническим комплексом в автоматизированном информационном пространстве // Автоматика и телемеханика. 2003. № 8. С. 145–162.
4. Глазов Б. И. Системология информационных отношений в сфере управления : монография. М. : ВА им. Петра Великого, 2005. 244 с.
5. Информатизация управления : монография / Под ред. Д. А. Ловцова. М. : ВА им. Петра Великого, 2003. 263 с.
6. Кульба В. В., Ковалевский С. С., Шелков А. Б. Достоверность и сохранность информации в АСУ : монография. М.: Синтег, 2003. 500 с.
7. Лобан А. В. Информационная технология распределенного диагностирования космических аппаратов : монография. М. : ДПК Пресс, 2015. 144 с.
8. Ловцов Д. А. Системология правового регулирования информационных отношений в инфосфере : монография. М. : РГУП, 2016. 316 с.
9. Ловцов Д. А. Информационная теория эргасистем: Тезаурус. М. : Наука, 2005. 248 с.
10. Ловцов Д. А. Концепция комплексного «ИКС»-подхода к исследованию сложных правозначимых явлений как систем // Философия права. 2009. № 5. С. 40–45.
11. Ловцов Д. А. Основные методологические понятия, концептуальные принципы и теоретико-прикладные положения правовой информатики // Правовая информатика. 2018. № 3. С. 4–15.
12. Ловцов Д. А. Проблема гарантированного обеспечения информационной безопасности крупномасштабных автоматизированных систем // Правовая информатика. 2017. № 3. С. 66–74.
13. Ловцов Д. А. Распределение информационных мер в эргасистеме // НТИ. Сер. 2. Информ. процессы и системы. 2002. № 10. С. 17–23.
14. Ловцов Д. А. Методы защиты информации в АСУ сложными динамическими объектами // НТИ. Сер. 2. Информ. процессы и системы. 2000. № 5. С. 29–45.
15. Ловцов Д. А. Введение в информационную теорию АСУ : монография. М. : ВА им. Петра Великого, 1996. 434 с.
16. Ловцов Д. А., Богданова М. В. Информационно-статистические показатели качества проектных инвестиций // НТИ. Сер. 2. Информ. процессы и системы. 2000. № 12. С. 28–36.
17. Ловцов Д. А., Сергеев Н. А. Управление безопасностью эргасистем : монография / Под ред. Д. А. Ловцова. М. : РАУ – Университет, 2001. 224 с.
18. Омельченко В. В. Общая теория классификации. Часть I. Основы системологии познания действительности / Предисл. Д. А. Ловцова. М. : Книжный мир, 2008. 436 с.
19. Омельченко В. В. Общая теория классификации. Часть II. Теоретико-множественные основания. М. : Либроком, 2010. 296 с.
20. Сухов А. В. Динамика информационных потоков в системе управления сложным техническим комплексом // Теория и системы управления. 2000. № 4. С. 111–120.
21. Сухов А. В., Зайцев М. И. Модельно-алгоритмическое обеспечение информационных систем управления. М. : Моск. ун-т им. С. Ю. Витте, 2016. 128 с.

THE INFORMATION THEORY OF ERGASYSTEMS: BASIC PROPOSITIONS

Dmitrii Lovtsov, Doctor of Science (Technology), Professor, Merited Scientist of the Russian Federation, Deputy Director for Research of Lebedev Institute of Precision Mechanics and Computer Engineering of the Russian Academy of Sciences, Head of the Department of Information Technology Law, Informatics and Mathematics of the Russian State University of Justice, Moscow, Russian Federation.

E-mail: dal-1206@mail.ru

Keywords: *information theory, ergasystems, conceptual statements, information value, information processing, information security, information efficiency, information conditions, information measures, information basis, information technologies, situational planning, principles, models, methods, requirements.*

Abstract.

Purpose of the paper: *improving the scientific and methodological basis of the legal informatics theory.*

Methods used: *system analysis, conceptual logical and mathematical modeling of ergasystems and information processes, formal logical development of efficient mathematical methods having methodological importance for legal informatics.*

Results obtained: *a general substantive characterisation of theoretical methodological and formal mathematical propositions of the information theory of ergasystems having theoretical and practical significance in sphere of informatisation and automation of control (regulation), relevant production and education; mathematical models of the ergasystem and*

Теоретические основы правовой информатики

functional subsystems, information process, information measurement, decision-making situation, task formulation process; a system of information indicators and efficiency criterion for an ergasystem; observability and controllability conditions for complex dynamic objects (CDO); mathematical methods: test dynamic optimisation of situational ordering of information processing tasks in a hierarchical system, information distributed teleprocessing, robust situational functional monitoring of a CDO's state, situational planning and forecasting the processes of exchange of privileged information in a heterogeneous stationary-cum-mobile system, remote monitoring of a CDO's onboard subsystems.

The importance of the considered propositions is due to the invariance of a significant part of them as regards a specific problem area (function) of control.

References

1. Betanov V. V., Larin V. K., Tiulin A. E. Sistemnyi podkhod k resheniiu zadach informatsionnogo obespecheniia upravleniia KA, M. : Radiotekhnika, 2018, 252 pp.
2. Buryi A. S. Otkazoustoichivye raspredelennye sistemy pererabotki informatsii : monografiia, M. : Goriachaia liniia – Telekom, 2016, 128 pp.
3. Buryi A. S., Sukhov A. V. Optimal'noe upravlenie slozhnym tekhnicheskim kompleksom v avtomatizirovannom informatsionnom prostranstve, Avtomatika i telemekhanika, 2003, No. 8, pp. 145-162.
4. Glazov B. I. Sistemologiiia informatsionnykh otnoshenii v sfere upravleniia : monografiia, M. : VA im. Petra Velikogo, 2005, 244 pp.
5. Informatizatsiia upravleniia : monografiia, pod red. D. A. Lovtsova, M. : VA im. Petra Velikogo, 2003, 263 c.
6. Kul'ba V. V., Kovalevskii S. S., Shelkov A. B. Dostovernost' i sokhrannost' informatsii v ASU : monografiia, M. : Sinteg, 2003, 500 pp.
7. Loban A. V. Informatsionnaia tekhnologiiia raspredelenного diagnostirovaniia kosmicheskikh apparatov : monografiia, M. : DPK Press, 2015, 144 pp.
8. Lovtsov D. A. Sistemologiiia pravovogo regulirovaniia informatsionnykh otnoshenii v infosfere : monografiia, M. : RGUP, 2016, 316 pp.
9. Lovtsov D. A. Informatsionnaia teoriia ergasistem: Tezaurus, M. : Nauka, 2005, 248 c.
10. Lovtsov D. A. Kontseptsiia kompleksnogo "IKS"-podkhoda k issledovaniiu slozhnykh pravoznachimykh iavlenii kak sistem, Filosofiiia prava, 2009, No. 5, pp. 40-45.
11. Lovtsov D. A. Osnovnye metodologicheskie poniatiiia, kontseptual'nye printsipy i teoretiko-prikladnye polozheniia pravovoi informatiki, Pravovaia informatika, 2018, No. 3, pp. 4-15.
12. Lovtsov D. A. Problema garantirovannogo obespecheniia informatsionnoi bezopasnosti krupnomasshtabnykh avtomatizirovannykh sistem, Pravovaia informatika, 2017, No. 3, pp. 66-74.
13. Lovtsov D. A. Raspredelenie informatsionnykh mer v ergasisteme, NTI, ser. 2, Inform. protsessy i sistemy, 2002, No. 10, pp. 17-23.
14. Lovtsov D. A. Metody zashchity informatsii v ASU slozhnymi dinamicheskimi ob'ektami, NTI, ser. 2, Inform. protsessy i sistemy, 2000, No. 5, pp. 29-45.
15. Lovtsov D. A. Vvedenie v informatsionnuu teoriuu ASU : monografiia, M. : VA im. Petra Velikogo, 1996, 434 c.
16. Lovtsov D. A., Bogdanova M. V. Informatsionno-statisticheskie pokazateli kachestva proektnykh investitsii, NTI, ser. 2, Inform. protsessy i sistemy, 2000, No. 12, pp. 28-36.
17. Lovtsov D. A., Sergeev N. A. Upravlenie bezopasnost'iu ergasistem : monografiia, pod red. D. A. Lovtsova, M. : RAU – Universitet, 2001, 224 c.
18. Omel'chenko V. V. Obshchaia teoriia klassifikatsii. Chast' I. Osnovy sistemologii poznaniia deistvitel'nosti, predisl. D. A. Lovtsova, M. : Knizhnyi mir, 2008, 436 pp.
19. Omel'chenko V. V. Obshchaia teoriia klassifikatsii. Chast' II. Teoretiko-mnozhestvennye osnovaniia, M. : Librokom, 2010, 296 pp.
20. Sukhov A. V. Dinamika informatsionnykh potokov v sisteme upravleniia slozhnym tekhnicheskim kompleksom, Teoriia i sistemy upravleniia, 2000, No. 4, pp. 111-120.
21. Sukhov A. V., Zaitsev M. I. Model'no-algoritmicheskoe obespechenie informatsionnykh sistem upravleniia, M. : Mosk. un-t im. S. lu. Vitte, 2016, 128 pp.