МОДЕЛИРОВАНИЕ ОРГАНИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ В ИЕРАРХИЧЕСКОЙ ЭРГАСИСТЕМЕ

Ловцов Д.А.*

Ключевые слова: *переработка информации, иерархическая эргасистема, ситуационное планирование, информационная неопределенность, парето-оптимальность, математические структуры, математическая модель, оптимальная координация, регулярный алгоритм, рандомизированный алгоритм, ситуационная функция выбора.*

Аннотация.

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

Метод: *системный анализ и математическое моделирование проблемной ситуации принятия решений по организации процессов переработки информации, формально-логическая разработка алгоритмов координационного планирования переработки информации.*

Результаты: *обоснованы принципы координационного планирования процессов переработки информации, предписывающие необходимость учета ситуационных факторов неопределенности при каждом новом решении задачи планирования; определена математическая структура модели проблемной ситуации принятия решений по организации процессов переработки информации в двухуровневой иерархической эргасистеме; разработаны многоэшелонный алгоритм рационального ситуационного планирования переработки информации, регулярные и рандомизированный алгоритмы оптимальной координации решений периферийных элементов, обеспечивающие выработку глобальных парето-оптимальных планов распределения средств, ресурсов и задач переработки информации в иерархической информационно-распределительной сети эргасистемы в условиях информационной неопределенности различного уровня.*

Полученные результаты являются базовыми для создания соответствующего эффективного информационно-математического обеспечения крупномасштабных эргасистем типа интегрированных АСУ объектами ракетно-космической техники, ГАС «Правосудие», ГАС «Выборы» и др.

DOI: 10.21681/1994-1404-2020-3-04-18

Введение

Все крупномасштабные эргасистемы (правовые, технические, экологические и др.) являются иерархическими, что обусловливает необходимость координации ситуационного [6, 10] планирования периферийными элементами эргасистемы процессов переработки информации на базе имеющихся у них штатных аппаратно-программных средств и ресурсов с оптимизацией распределения между периферийными элементами экзогенных (общесетевых) ресурсов для обеспечения информационной эффективности эргасистемы в целом.

С целью адекватного отражения реальных процессов *ситуационного* планирования переработки информации в иерархической эргасистеме, т.е. для реализации количественно обоснованного выбора ситуационного рационального варианта использования аппаратно-программных средств и ресурсов эргасистемы требуется построение специальной *математической модели проблемной ситуации принятия решений*, определяющей формальные шаги (этапы) процессов ситуационного распределения средств, ресурсов и отдельных задач переработки информации (ЗПИ) между периферийными и центральным (координирующим) элементом. А также определяющей стратегии оптимальной координации ситуационного планирования переработки информации в условиях частичной или полной информационной неопределенности.

Решаемая в центральном элементе эргасистемы задача оптимизации координации относится к классу задач многокритериальной оптимизации, которым

* ***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, Российская Федерация, г. Москва.*

E-mail: dal-1206@mail.ru

присуща неопределенность в выборе цели оптимизации, обусловленная наличием набора противоречивых критериев и трудно формализуемых моделей, таких как, например, модель поведения человека-оператора (в качестве элемента процесса принятия решений). Представляется актуальной разработка алгоритмов решения указанной задачи в условиях различного уровня неопределенности в выборе цели:

при *минимальной неопределенности* в выборе цели оптимизации (с полной информацией о выборе цели) – формулировка таких задач содержит всю информацию о наборе критериев, правил предпочтений и законе изменения этих правил, а алгоритмы решения реализуют регулярные стратегии оптимизации;

при *максимальной неопределенности* в выборе цели оптимизации (с максимально неполной информацией о выборе цели) – в таких задачах часто не удается на этапе постановки сформулировать правила предпочтений и (или) закон изменения этих правил, а алгоритмы выработки решений реализуют *рандомизированные* стратегии оптимизации, причем рандомизация и последующее сглаживание вводятся для построения у лица, принимающего решения (ЛПР), процедур принятия решений (выбора целей оптимизации) [2, 5, 13].

Принципы координационного планирования процессов переработки информации

Задачи ситуационного планирования переработки информации в иерархической эргасистеме входят в класс задач иерархического принятия (выбора) решений, для которых характерен упорядоченный выбор (процедура извлечения некоторого элемента из множества допустимых решений, вариантов, альтернатив) элементов сложной составной альтернативы:

$$W =< W_1, W_2, \dots W_n > \quad (1)$$

где W – план (вариант) распределения ЗПИ, средств и ресурсов, по своей сущности являющийся выбором с мультипредпочтением (с многими отношениями предпочтения $F_\alpha(W), \alpha = 0,1,2, \dots, n$).

Подклассом задач *иерархического выбора* являются задачи *координационного выбора*, связанные с введением координирующих сигналов (между уровнями, содержащими подсистемы принятия решений) с целью решения проблемы адекватного отражения сложных организационно-технических эргасистем. Основные достоинства координационного выбора проявляются в связи с учетом факторов неопределенности и уменьшением их влияния за счет разнесения выбора в пространстве [11, 13].

Координационным называется такой выбор в иерархической системе, при котором подсистема (элемент) верхнего уровня (эшелона) воздействует на подсистему (элементы) нижних уровней посредством координирующих сигналов, влияющих на выбор этих подсистем, что, в свою очередь, определяет и степень достижения цели подсистемой верхнего уровня (координирующим центром).

Таким образом, с содержательной точки зрения основная особенность координационного выбора в эргасистеме состоит в том, что центральный элемент (ЦЭ) достигает своих целей (экстремума своей целевой функции $F_0(W)$) опосредованно, путем соответствующего координирующего воздействия $W_0 =< W_1^0, W_2^0, \dots W_n^0 >$ на периферийные элементы (ПЭ).

Целью координации может быть *сатисфакция*, т.е. ограничение возможностей выбора для ПЭ некоторой удовлетворительной с точки зрения ЦЭ областью (множеством Δ допустимых альтернатив $W_b = W_s =< W_{1s}, W_{2s}, \dots \quad \dots W_{hs} >$) в соответствии с набором ограничений для целевых функций ПЭ $F_x \le F_{xs},\ x = \overline{1,n}$; либо *оптимизация*, т.е. достижение ЦЭ наилучших $W_b = W^* =< W_1^*, W_2^*, \dots, W_h^* >$ в соответствии со своей целевой функцией $F_{\text{ЦЭ}}(W) = F_0(W)$ и структурой (зависящей от факторов неопределенности $\omega \in \Omega$) выбора результатов. Координирующие сигналы $F_x[W(W^0)], x = \overline{1,n}$, выбираемые ЦЭ и сообщаемые им ПЭ, вводятся в целевые функции и (или) в ограничения оптимизационных задач ПЭ. При этом ПЭ производят выбор в соответствии с W_x^0 и своими результирующими отношениями предпочтения $F_{xp}[W_x(W_x^0)], x = \overline{1,n}$, а результирующее отношение предпочтения ЦЭ $F_{op}(W) = F_0[W(W^0)]$, где $W(W^0)$ – *ситуационная функция выбора* (СФВ), определяемая в соответствии с правилами согласования выбора для совокупности ПЭ.

Для рассматриваемого класса задач СФВ определяют выбор элемента W^0 в зависимости от ситуации, характеризуемой конкретными значениями W_x или пары $< W_x, \omega >$. Получение явных аналитических выражений для СФВ $W^0(W_x)$ и $W^0(W_x, \omega)$ не представляется возможным, но их можно определить с помощью табличных представлений или алгоритмически. Последнее означает, что в каждой конкретной ситуации задачу планирования переработки информации нужно решать заново при новых данных $\omega \in \Omega$.

В результате использования СФВ результирующее отношение предпочтения $F_{xp},\ x = \overline{1,n}$ (с учетом того, что W_x выбирается раньше W^0) представляется с помощью функции

$$F_{xp}(W_x) = F_x[W_x, W^0(W_x)], \quad (2)$$

а семейство $F_{xp}(\omega),\ x = \overline{1,n}$ – с помощью функций вида:

$$F_{xp}(W_x, \omega) = F_x[W_x, W^0(W_x, \omega)] \quad (3)$$

или

$$F_{xp}(W_x, \omega) = F_x[W_x, W^0(W_x, \omega), \omega]. \quad (4)$$

Для (2) при условии, что решение *задачи минимизации* существует, имеем:

$$W_x^* = \text{Argmin}\, F_x\, [W_x, W^0(W_x)]. \quad (5)$$

Для (3) и (4) при условии, что на множестве Ω неопределенностей задана вероятностная мера Q, введем осредненные результирующие отношения предпочтения с помощью функций:

$$F_{xp}(W_x) = M_W\,\{F_x[W_x^0(W_x,\omega)]\} \quad (6)$$

или

$$F_{xp}(W_x) = M_W\,\{F_x[W_x, W^0(W_x,\omega),\omega]\}, \quad (7)$$

где M_W– символ операции математического ожидания.

Тогда решения, соответственно, запишутся в виде:

$$W_x^* = \underset{W_x\in\Delta_x}{\mathrm{Argmin}}\ M_W\ \{F_x[W_x, W^0(W_x,\omega)]\}, \quad (8)$$

$$W_x^* = \underset{W_x\in\Delta_x}{\mathrm{Argmin}}\ M_W\ \{F_x[W_x, W^0(W_x,\omega),\omega]\}. \quad (9)$$

Для (4) возможна ситуация, когда никакие характеристики для множества Ω не вводятся. Тогда путями снятия неопределенности являются использование принципов *минимакса* и *минимина* и получения решений вида:

$$W_x^* = \underset{W_x\in\Delta_x}{\mathrm{Argmin}}\ \max_{\omega\in\Omega} F_x\ [W_x, W^0(W_x,\omega),\omega], \quad (10)$$

$$W_x^* = \underset{W_x\in\Delta_x}{\mathrm{Argmin}}\ \min_{\omega\in\Omega} F_x\ [W_x, W^0(W_x,\omega),\omega]. \quad (11)$$

Математическая структура модели проблемной ситуации

Изучение технологических процессов переработки информации (ТППИ) в иерархических эргасистемах [3] с использованием информационно-математических методов неизбежно приводит к исследованию соответствующих *математических структур* принятия (выбора) решений. В теории математических структур[1] [13] понятие рода математической структуры принятия решений, заданного на шкале множеств, определяется в виде следующей математической конструкции:

$$< \sum, \{\Delta_x\}_{x\in X}, \{\Delta_h^0\}_{h\in H}, \{\Lambda_l\}_{l\in L}, \{\mathrm{Y}_a\}_{a\in\Gamma}, \{\mathrm{Y}_b^*\}_{b\in\Gamma^*}, \boldsymbol{A}\ > , \quad (12)$$

где $\sum$ – род исходной математической структуры, с которым определённым образом связываются множества элементов (альтернатив) выбора, что обусловливает введение *косвенных*, вводимых с помощью специальных математических конструкций α– и β– ограничений (в отличие от прямых ограничений, вводимых непосредственным перечислением границ или характерных свойств допустимых альтернатив выбора, таких, как *целочисленность, булевость, положительность* и др.) при конкретизации математической структуры; α– ограничения *первого* рода, задаваемые функционально-операторным (в виде равенств и неравенств) или аксиоматическим (на языке исчисления предикатов) способами; β– ограничения *второго* рода, задаваемые типовыми (структурными) характеристиками (путём введения графовой или логико-алгебраической структуры и др.);

$\{\Delta_x\}_{x\in X}$ – множество, принадлежащее к совокупности основных базисных множеств элементов (альтернатив) выбора; в числе базисных множеств содержатся ситуационные множества случайных элементов $\{\Omega_y\}, y = 1,2,3,\ldots$, учитывающих факторы неопределённости;

$\{\Delta_h^0\}_{h\in H}$ – множество из совокупности вспомогательных базисных множеств элементов выбора;

$\{\Lambda_l\}_{l\in L}$ – вспомогательное базисное множество (шкала) оценок, вводимое в случае, если предусматриваются оценки, т.е. задаются отношения предпочтения с помощью функции полезности (целевой функции или функционала) F на соответствующей входной Y_a или выходной $\mathrm{Y}_b{}^*$ ступени (обычно $\Lambda_l = E_l$, где E_l – одномерное евклидово пространство);

$\{Y_a\}_{a\in\Gamma}, \{\mathrm{Y}_b^*\}_{b\in\Gamma^*}$ – схемы конструкции соответственно a-й входной и b-й выходной ступеней шкалы множеств выбора, строящихся над базисными множествами с помощью операций взятия декартовых произведений и булеанов по определённым правилам;

$\boldsymbol{A}$ – аксиоматика, постулирующая свойства исходных (входных) отношений предпочтения, задаваемых на входных ступенях и правила построения на выходных ступенях результирующих (выходных) отношений предпочтения или (и) результирующих функций выбора с учетом связей с математической структурой рода Σ.

Конкретизация выражения (12) для практической задачи планирования процесса переработки информации в двухуровневой иерархической *информационно-распределительной сети* (ИРС) эргасистемы на основе координации выбора оперативного рационального плана распределения аппаратно-программных средств переработки информации приводит к соответствующей *конкретной математической структуре* выбора со следующими компонентами (математическими свойствами)[2] [8]:

n базисными множествами

$\Delta_1 = \{W_1\},\ \Delta_2 = \{W_2\}, \ldots, \Delta_n = \{W_n\},$

$\Delta_x = \Delta_a\ \ (a\in\Gamma, x\in X, x = a = \overline{1,n});$

одним вспомогательным базисным множеством координирующих сигналов (элементов выбора) $\Delta_{h=1}^0 = \Delta^0 = \{W^0\};$

$n+1$ ситуационными множествами неопределенности $\Omega_0 = \{\omega_0\},\ \Omega_1 = \{\omega_1\},\ \Omega_2 = \{\omega_2\}, \ldots,$ $\Omega_n = \{\omega_n\};$

$n+1$ входными ступенями шкалы множеств вида:

а) $Y_0 = \Delta = \Delta_1\times\Delta_2\times\ldots\times\Delta_{nx} = \prod\Delta_x$ – входная ступень, на которой задается исходное отношение предпочтения ЦЭ с помощью функции $\mathrm{F}_0(W) = F_0(W_1, W_2, \ldots, W_n);$

б) $Y_a = \Delta^0\times\Delta_a\ (a\in\Gamma, a = \overline{1,n})$ – входные ступени, на которых задаются исходные отношения предпочтения ПЭ с помощью функций $F_a(W^0, W) = F_a(W_a^0, W_1, \ldots, W_n);$

$n+1$ выходными ступенями шкалы множеств вида:

а) $Y_0^* = \Delta^0\times\Omega_0$ – выходная ступень ЦЭ, на которой строится результирующее отношение предпочтения в виде:

[1] Бурбаки Н. Теория множеств. М.: Мир, 1965. 455 с.

[2] *См.*: Ловцов Д. А. Введение в информационную теорию АСУ: Монография. М.: ВА им. Петра Великого, 1996. 434 с.

$F_{op}(W,\omega) = F_0\{W[W^0(\omega_0),\omega)]\}$;

б) $Y_b^* = \Delta_b \times \Omega_b$ $(b \in \Gamma^* = \Gamma,\ b = a = \overline{1,n})$ – выходные ступени ПЭ, на множестве которых, точнее, на множестве $\Gamma^* = \{0,1,2,\dots,n\}$, введено отношение линейного частичного строгого порядка, которому удовлетворяют пары $< 0, x >$. Последнее означает, что ЦЭ первым выбирает координирующий сигнал в виде кортежа $W^0 =< W_1^0, W_2^0, \dots, W_n^0 >$, который он сообщает (в части касающейся, т.е. W_b^0, $b = \overline{1,n}$) ПЭ, производящим выбор на выходных ступенях Y_{b^*} в соответствии с W_{b^*} и своими результирующими отношениями предпочтения:

$$F_p(W^0, W, \omega) = P\{[F_b(W^0, W, \omega)],\ \ b = \overline{1,n}\} \quad (13)$$

где P – правило взаимодействия ПЭ.

В процессе целевого функционирования СДО в эргасистеме решаются задачи выбора кортежных альтернатив:

$$W =< W_1, \dots, W_n > \in \Delta = \Delta_1 \times \Delta_2 \times \dots \times \Delta_n, \quad (14)$$

$$W^0 =< W_1^0, \dots, W_n^0 > \in \Delta^0 = \Delta_1^0 \times \Delta_2^0 \times \dots \times \Delta_n^0, \quad (15)$$

где W_b, $b = \overline{1,n}$, – основное решение для b-го ПЭ; W_b^0 – ресурс, выделяемый b-му ПЭ.

Целевая функция эргасистемы:

$$F_p(W^0, W, \omega) = P\{[F_b(W^0, W, \omega)],\ \ b = \overline{1,n}\} \quad (16)$$

ограничения:

$$W^0 \in \Delta^{0*}(\omega), \quad \Delta^{0*}(\omega) \subseteq \Delta^0; \quad (17)$$

$$< W^0, W > \in \Delta', \quad \Delta' \subseteq \Delta^0 \times \Delta; \quad (18)$$

$$W \in \Delta_{\alpha\beta}(\omega), \quad \Delta_{\alpha\beta}(\omega) \subseteq \Delta. \quad (19)$$

Ограничения (17), (18) связаны с распределением *общего* (экзогенного) ресурса по ПЭ, причем в (17) учитывается влияние возмущений $\omega = \omega_0 \times \Omega$ на выбор ЦЭ; (19) – связано с условиями функционирования ПЭ, на которые воздействуют возмущающие факторы:

$$\omega_j =< \omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n > \in \Omega_1 \times \Omega_2 \times \dots \times \Omega_n, j = 1,2, \dots, \quad (20)$$

кроме того, Δ – множество, учитывающее косвенные α-, β-ограничения.

Возмущающие факторы $i = 0,1,2,\dots,n$; $j = 1,2,\dots$, в частности, можно учесть для конкретной ситуации принятия решения в виде дополнительных косвенных ограничений, задаваемых, если это возможно, перечисленными в (12) способами. При этом причинами возмущений могут явиться технические неисправности средств переработки информации; команды ЦЭ и вышестоящих инстанций и лиц; радиоэлектронная обстановка в районе элементов эргасистемы: вопросы электромагнитной совместимости и др.

Для перехода от данной конкретной *математической структуры* к структуре математической модели ситуации принятия решений по организации переработки информации в иерархической эргасистеме введем *предположения*:

– ПЭ полномочны принимать основные решения $W_b \in \Delta_b$ в условиях знания воздействия возмущающих факторов $\omega_0 \in \Omega_0$;

– ЦЭ выполняет функции распределения экзогенного ресурса $W^0 \in \Delta^{0*}(\omega)$, который рассматривается как кортеж координирующих сигналов $< W_1^0, W_2^0, \dots, W_n^0 >$ в условиях знания возмущающего воздействия $\omega_0 \in \Omega_0$;

– главная (глобальная) целевая функция:

$$F_0(W,\omega) = F_0\{F_1[W_1^0(\omega_0), W_1, \omega_1], \dots, \dots, F_n[W_n^0(\omega_0), W_n, \omega_n]\}; \quad (21)$$

– ограничения, за исключением $W^0 \in \Delta^{0*}(\omega)$, являются распадающимися и заменяются следующей эквивалентной системой ограничений:

$$< W_b^0, W_b > \in \Delta_b^0 \times \Delta_{b\alpha\beta},\ \ W_b \in \Delta_{b\alpha\beta}(\omega),\ \ b = \overline{1,n}, \quad (22)$$

т.е. ПЭ в своем выборе независимы по отношению друг к другу; решение каждой локальной оптимизационной задачи $F_b(W_b^0, W_b, \omega)$, решаемой ПЭ, существует и единственно.

В результате СФВ периферийных элементов определяются из соотношения:

$$W(W^0,\omega) = \langle \underset{W_1 \in \Delta_{1\alpha\beta}(\omega)}{\mathrm{Argmin}}\ F_1(W_1^0, W_1), \dots, \underset{W_n \in \Delta_{n\alpha\beta}(\omega)}{\mathrm{Argmin}}\ F_n(W_n^0, W_n)\rangle \quad (23)$$

или, точнее, из соотношения:

$$W(W^0,\omega) = \langle \underset{W_1 \in \Delta_1^*(W_1^0,\omega_1)}{\mathrm{Argmin}}\ F_1(W_1), \dots, \underset{W_n \in \Delta_n^*(W_n^0,\omega_n)}{\mathrm{Argmin}}\ F_n(W_n)\rangle, \quad (24)$$

$$\Delta_b^*(W_b^0, \omega_b) = \{W_b \mid < W_b^0, W > \in \Delta_b^0 \times \Delta_{b\alpha\beta},\ W_b \in \Delta_{b\alpha\beta}(\omega_b)\}, \quad (25)$$

а оптимальный координирующий сигнал (оптимальное распределение ресурса по ПЭ, т.е. аппаратно-программных средств переработки информации) находится из:

$$W^{0*} = \underset{W^0 \in \Delta^{0*}(\omega)}{\mathrm{Argmin}}\ F_0[W(W^0,\omega)] = \underset{W^0 \in \Delta^{0*}(\omega)}{\mathrm{Argmin}}\ F_0\{F_1[W_1^0(\omega_0), W_1, \omega_1], \dots, F_n[W_n^0(\omega_0), W_n, \omega_n]\}. \quad (26)$$

Принципиальную возможность решения ЦЭ многокритериальной задачи поиска W^{0*} предлагается обеспечить на основе агрегирования (свертки) локальных ЦФ (ЛЦФ), причем возможными видами глобальной ЦФ $F_0[W(W^0,\omega)$ могут, в частности, выступать свертки типа[3] [8, 13]:

– сумма ЛЦФ:

$$F_{01}{}^{(\Sigma)} = \sum_{x=1}^{n} F_x[W_x^0(\omega), W_x, \omega_x]; \quad (27)$$

– сумма взвешенных ЛЦФ:

$$F_{02}{}^{(\Sigma)} = \sum_{x=1}^{n} \lambda_x F_x[W_x^0(\omega_0), W_x, \omega_x]; \quad (28)$$

– произведение взвешенных степеней ЛЦФ:

$$F_{03}{}^{(\Pi)} = \prod_{x=1}^{n} (F_x[W_x^0(\omega_0), W_x, \omega_x])^{\vartheta_x}; \quad (29)$$

– сумма взвешенных степеней ЛЦФ:

[3] Ловцов Д. А., Семеряко И. И. Имитационное моделирование выработки решений в АСУ. М.: ВА им. Петра Великого, 1989. 235 с.

$$F_{04}{}^{(\Sigma)} = \sum_{x=1}^{n} \lambda_x (F_x[W_x^0(\omega_0), W_x, \omega_x])^{\vartheta_x}; \qquad 30)$$

– сумма степеней взвешенных ЛЦФ:

$$F_{05}{}^{(\Sigma)} = \left\{ \sum_{x=1}^{n} (\lambda_x F_x[W_x^0(\omega_0), W_x, \omega_x])^{\gamma} \right\}^{1/\gamma}; \qquad (31)$$

– сумма взвешенных отклонений ЛЦФ:

$$F_{06}{}^{(\Sigma)} = \sum_{x=1}^{n} \lambda_x (F_x - F_x^*), \qquad (32)$$

где

$$\lambda_x, \vartheta_x, x = \overline{1,n};\ \lambda_x \geq 0;\ \sum_{x=1}^{n} \lambda_x = 1;\ \vartheta_x \geq \geq 0;\ \sum_{x=1}^{n} \vartheta_x = 1 \qquad (33)$$

– приоритетные (весовые) коэффициенты и показатели, определяемые методом экспертных оценок, назначением или на основе сопоставления вектора значений ЛЦФ (вектора оценок) $F = \|F_1, F_2, \dots, F_n\|^{\mathrm{T}}$ с вектором, получаемым в результате тех или иных перестановок компонент F. В последнем случае формируются *правила*, позволяющие использовать информацию от ЛПР для определения равноценности и превосходства ЛЦФ, а также для определения степени превосходства.

В результате вводится система равенств и неравенств, позволяющих существенно уменьшить произвол в назначении коэффициентов, λ_x, ϑ_x (веса λ_x существуют по лемме С. Карлина для любого эффективного решения выпуклой задачи[4]); γ – произвольное, фиксированное положительное число, причем $\gamma > \gamma_{\text{п}}$ – порогового значения $(\gamma_{\text{п}} \geq 1)$, определяемого в результате решения сложных оптимизационных задач, или приближенно в каждом конкретном случае построения множества Парето [12] на основе $F_{05} \to \min$ в семействе тестовых задач, увеличивая при этом значение γ в (31) до тех пор, пока во всех тестовых задачах будут выявлены все паретовские точки; F_x^*, $x = \overline{1,n}$, – некоторые базовые значения, с которыми сравниваются оптимизируемые ЛЦФ.

Основные способы нормализации неоднородных (имеющих различную размерность) ЛЦФ в (27) можно представить следующим образом:

$$F_{x\,\max} - F_x(W^{\text{o}}, W);\quad F_x(W^{\text{o}}, W) - F_{x\,\min};$$

$$F_x(W^{\text{o}}, W) - F_{x\,\max};$$

$$\frac{F_{x\max} - F_x(W^{\text{o}}, W)}{F_{x\max}};\ \frac{F_{x\max} - F_x(W^{\text{o}}, W)}{F_{x\max} - F_{x\min}}; \qquad (34)$$

$$\frac{F_x(W^{\text{o}}, W) - F_{x\min}}{F_{x\max} - F_{x\min}}$$

В частности, когда ЛЦФ неоднородны, и одна часть $(x = \overline{1,k})$ ЛЦФ подлежит *максимизации*, а другая $(x = \overline{k+1,n})$ – *минимизации*, в качестве ГЦФ можно использовать относительную суммарную потерю всех ЛЦФ при выборе компромиссного решения:

$$F_0(W) = \sum_{x=1}^{k} \frac{F_{x\max}(W) - F_{x\max}(W^*)}{F_{x\max}(W^*)} + \sum_{x=k+1}^{n} \frac{F_{x\min}(W^*) - F_{x\min}(W)}{F_{x\min}(W^*)}$$

Недостаток, который присущ всем способам свертки, состоит в том, что при решении задачи оптимизации ГЦФ вклад каждой ЛЦФ в общий итог неразличим. При этом возможны ситуации, когда улучшение одной или нескольких ЛЦФ осуществляется в ущерб остальным, что не отражается на значении ГЦФ. В настоящее время существуют различные способы устранения данного недостатка, которые состоят в усложнении вида свертки или введении в нее значений $\lambda_x(F_x)$, зависящих от значений ЛЦФ и др. Однако пока не найдено эффективных методов, с помощью которых удается полностью устранить указанный недостаток.

Относительные убытки по различным ЛЦФ (другими словами, положение решения в области Парето) определяются не только значениями λ_x, $x = \overline{1,n}$, в ГЦФ, но и параметрами моделей (типа «вход – выход»), описывающих исходную задачу. И если для простой задачи вид такой зависимости определить сравнительно просто, то в случае сколько-нибудь сложных нелинейных моделей данный вопрос решать гораздо трудней, а часто и невозможно [4].

В общем виде проблема свертки ЛЦФ в скалярную ГЦФ формулируется как задача построения монотонной или выпуклой функции

$$Y[F_0(W)] = Y\{F_1(W), F_2(W), \dots, F_n(W)\}, \qquad (35)$$

отвечающей некоторым целям компромисса (глобальным целям оптимизации). В [13] сформулированы условия и доказывается теорема об их необходимости и достаточности для того, чтобы (35) была представлена в форме (28).

Семейство сверток, из которого выбирается конкретный набор сверток, должно удовлетворять следующим требованиям[5] [12]:

оптимум любой свертки из семейства принадлежит множеству Парето – *неизбыточность*;

для любой паретовской точки найдется свертка, оптимум которой как угодно близок к данной точке – *достаточность*.

Решения, получаемые с применением сверток видов (27) – (32), оптимальны по Парето. Однако применение агрегированных ГЦФ видов (29) – (32) гарантирует получение всех точек Парето в исследуемой многокритериальной дискретной задаче, а ГЦФ видов (27), (28) – не дает такой гарантии (в силу их линейности).

Предпочтение к виду $F_0(W, \omega)$ может исходить с учетом сказанного из практического опыта их применения, наличия необходимой априорной информации, а также из правила P взаимодействия ПЭ. В последнем

[4] Карлин С. Математические методы в теории игр, программировании и экономике. М.: Мир, 1964. 838 с.

[5] 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.

случае ЛЦФ являются взаимозависимыми, что проявляется в зависимости важности ЛЦФ от принимаемых ими значений, определяемых, в свою очередь, выбираемой альтернативой . При этом

$$F_{op}(W,\omega) = F\{\lambda(W), F_0(W), \omega\}, \quad (36)$$

где $\lambda(W)$ – неизвестная функция от W.

Для определения значений $\lambda(W)$ необходимо построение диалоговой (человеко-машинной) системы оптимизации, в которой по мере решения оптимизационной задачи на каждом æ-шаге определяется $F_0(W)$, и в соответствии с этим от ЛПР получается информация для определения $\lambda(W)$.

Кроме того, для обеспечения корректности и полноты формулировки многокритериальной оптимизационной задачи, решаемой ЦЭ, требуется введение *ограничений* (условий), которыми следует руководствоваться при оптимизации отдельных ЛЦФ ПЭ:

правил предпочтения, определяющих способ установления компромисса между противоречивыми требованиями, выдвигаемыми необходимостью минимизировать все ЛЦФ одновременно;

закона изменения правил предпочтения, устанавливающего правила перехода к новым правилам предпочтения на $(æ+1)$-шаге поиска решения, если на предыдущем æ-м шаге решение отсутствует.

Первые условия вводятся в виде соотношений:

$$\Delta F_x/\Delta F_{x+1} = \sigma_x, \quad x = \overline{1, n-1} \quad (37)$$

или

$$\Delta F_x/\Delta F_x{}^* = \sigma_x, \quad x = \overline{1, n}, \quad (38)$$

или

$$\Delta F_x \le \Delta F_x{}^*, \quad x = \overline{1, n}, \quad (39)$$

где ΔF_x – величина отклонения от оптимального значения x-й ЛЦФ; σ_x – заданные (заранее) пропорции, в которых осуществляется минимизация ЛЦФ по отношению друг к другу (37) или в отношении некоторого иного базового значения $\Delta F_x{}^*$ (38).

Выражение (39) определяет область U компромиссов, внутри которой либо все решения $W(W^0) \in \Delta_{\alpha\beta}$ считаются равноценными, либо минимизируется дополнительный $n+1$ критерий J. В последнем случае на множестве U решается дополнительная оптимизационная задача:

$$J: F_{n+1}[W(W^0)] \to \min_{W(W^0)\in U} \quad (40)$$

$$U = \{W(W^0) | F_x \le F_x{}^*, \ W(W^0) \in U \quad \forall x\}. \quad (41)$$

Закон изменения правил предпочтения, т.е. закон изменения σ_x, $F_x{}^*$, в (37), (38), (39), (41) устанавливает, на какую величину следует уменьшить или увеличить σ_x, $F_x{}^*$, перед каждым последующим шагом поиска решения. Закон изменения σ_x и $F_x{}^*$ может быть более сложным, если при отсутствии решения при первоначально заданных значениях σ_x, $F_x{}^*$ одни из коэффициентов могут уменьшаться, другие – увеличиваться.

Итак, получена *математическая структура* (23) – (26) модели проблемной ситуации принятия решений по организации процесса переработки информации в двухуровневой иерархической эргасистеме, определен *способ* (агрегирование ЛЦФ ПЭ с применением (27) – (32)) и рассмотрены *особенности* (использование приоритетных (p_x) коэффициентов $\lambda = \varphi(p_x)$, $p = \overline{1, m}$; $x = \overline{1, n}$, введение правил предпочтения и закона их изменения) решения в ЦЭ многокритериальных оптимизационных задач координации для обеспечения согласования локальных решений ПЭ с ГЦФ вида (21).

Многоэшелонный алгоритм рационального ситуационного планирования переработки информации в эргасистеме

На основе сказанного, а также с учетом структурно-функциональных особенностей ИРС эргасистем и специфики ситуационного планирования процессов переработки информации разработана многоуровневая процедура (алгоритм) координационного стохастического выбора рационального плана (решения $<W^*, W^{0*}>$) распределения задач и ресурсов в иерархической ИРС (рис. 1):

Шаг 1. Задание и ввод ситуационных исходных данных (СИД): множеств Δ, Δ^0, Ω_0, Ω; приоритетных коэффициентов $\lambda = \varphi(p_x)$, $x = 1, n$; правил предпочтения (ПП) и закона их изменения; удовлетворительного (сатисфакционного) значения F_{0S} ГЦФ; максимально допустимого времени T_p принятия решения (блок 1).

Шаг 2. Определение (в ЦЭ) ситуации, характеризуемой возмущающим воздействием $\omega_0 \in \Omega_0$, и формирование соответствующего множества $\Delta^{0*}(\omega_0) \in \Delta^0$ альтернативных координирующих сигналов (бл. 2, 3).

Шаг 3. Выбор начального (на первой итерации $æ = 1$) или коррекция текущего (при $æ > 1$) значения $W^0 = W^0(\lambda) \in \Delta^{0*}(\omega_0)$ сетевого координирующего сигнала (бл. 4 – 7).

Шаг 4. Определение (в ПЭ) ситуаций, характеризуемых возмущающими воздействиями ω_x, $x = \overline{1, n}$, и формирование соответствующего сетевого множества $\Delta_{\alpha\beta}(\omega) \subseteq \Delta$ основных решений (бл. 8, 9).

Шаг 5. Получение СФВ (решения) $W \in \Delta_{\alpha\beta}(\omega)$ (бл. 10, 11).

Шаг 6. Построение и расчет ГЦФ $F_0 = F_0\{W[\lambda(p_x)], \omega\}$ (бл. 12).

Шаг 7. Проверка на удовлетворительность (оптимальность): $F_0(W,\omega) \le F_{0S}$ и своевременность: $æT_x < T_p$ (T_x – среднее время итерации) полученного глобального плана $< W^*, W^{0*} > \in \Delta_{\alpha\beta}(\omega) \times \Delta^{0*}(\omega)$ и вывод результатов планирования (бл. 15).

Согласно данному многоуровневому (многоэшелонному) алгоритму оптимизации процедура выбора пары $< W^*, W^{0*} >$ носит итерационный характер: ЦЭ, получая информацию относительно решений $W_b^* \in \Delta_b(\omega_b), b = \overline{1, n}$ (оптимальных планов распределения ЗПИ) ПЭ и решая затем многокритериальную задачу оптимизации координации, подбирает для данных конкретных возмущающих воздействий

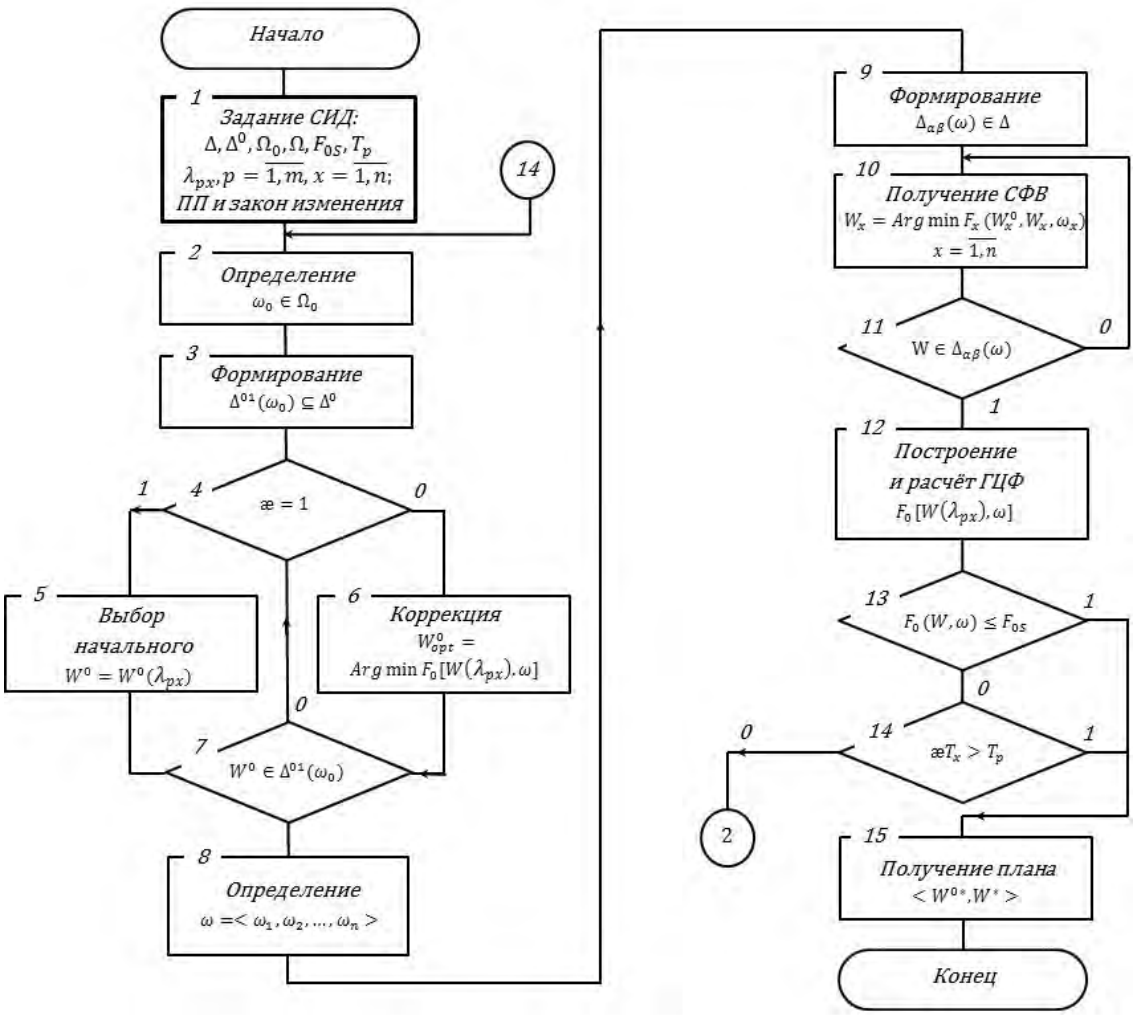

Рис. 1. Схема многоэшелонного алгоритма ситуационного планирования ТППИ в иерархической сети эргасистемы

$\omega_0 \in \Omega_0$ оптимальный координирующий сигнал W^{0*} (оптимальный план использования сетевых аппаратно-программных средств и ресурсов переработки информации), т.е. организуется итерационный процесс координации с целью коррекции W^{0*}. Сходимость алгоритма обеспечивается использованием конечных множеств и значений исходных данных.

Таким образом, рассмотрена *модель проблемной ситуации* принятия организационно-технических решений по планированию процессов переработки информации в иерархической ИРС эргасистемы, в структуру которой (см. (23) – (26)) введены координирующие сигналы между уровнями ИРС, содержащими подсистемы принятия решения, а алгоритм предписывает итерационный процесс выбора рационального решения.

Согласно данной модели оптимизацию ситуационного планирования переработки информации в иерархической ИРС эргасистемы следует осуществлять на двух эшелонах иерархии сети поэтапно:

– в ЦЭ оптимизировать координацию ПЭ по принципу согласования взаимодействий (предусматривающему модификацию ЛЦФ $F_x(W_x^0, W_x, \omega_x), x = \overline{1,n}$ ПЭ с помощью координирующих параметров W^0, задаваемых ЦЭ) на основе минимизации многомерной ГЦФ $F_0 = F_0\{W[\lambda(p_x)], \omega\}$ с учетом приоритетных коэффициентов $\lambda(p_x), x = \overline{1,n};\ p = \overline{1,m}$ ЛЦФ и складывающихся ситуаций;

– в ПЭ оптимизировать принятие основных решений (включающих решения на разбиение множества ЗПИ по уровням иерархии ИРС эргасистемы и на упорядочение одноуровневых ЗПИ) на основе минимизации одномерных ЛЦФ $F_x(W_x^0, W_x, \omega_x), x = \overline{1,n},$ с учетом складывающихся ситуаций и координирующих параметров W^0.

Регулярные алгоритмы оптимальной координации решений периферийных элементов

Вначале допустим, что имеется вся информация, необходимая для решения задачи координации в ИРС, т.е. заданы:

– набор локальных целевых функций

$$F_x[W(W^0)], x = \overline{1,n}; \tag{42}$$

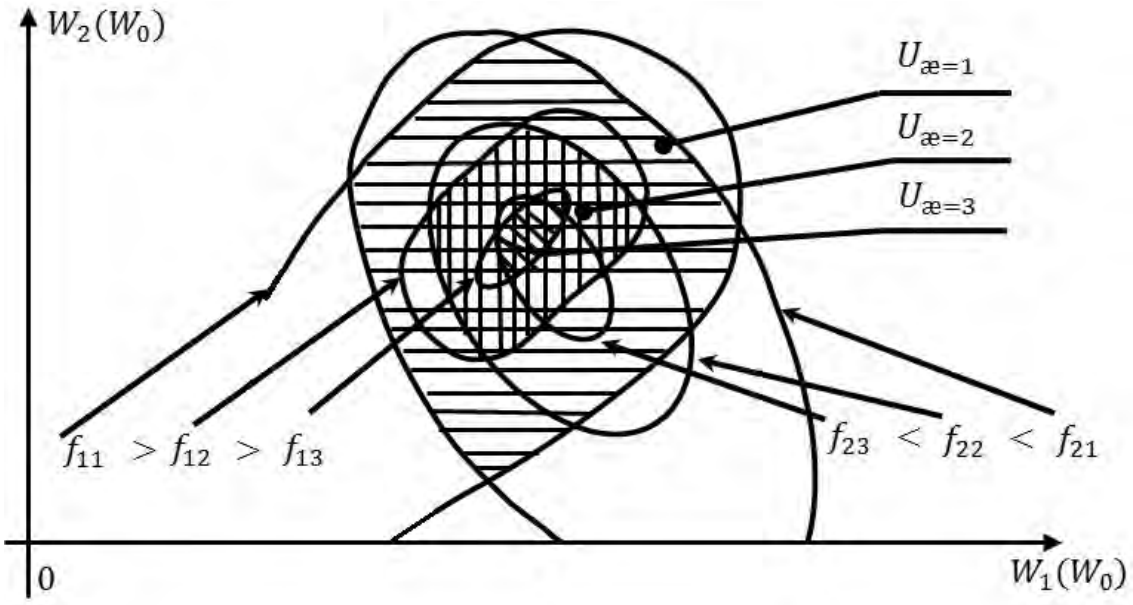

Рис. 2. Геометрическая интерпретация сужения парето-оптимальной области в ходе решения задачи координации

– парето-оптимальная область U в виде ограничений $F_x < F_x^*, x = \overline{1,n},$ (43)

где F_x^* – оптимальные значения ЛЦФ, полученные при их минимизации в периферийных элементах без учета остальных ЛЦФ (для аналогичного случая в [4] предлагается строить $\lambda_x = 1/F_x^*$, называя такой подход равномерным приближением к вектору $F_0^* = \{F_1^*, \dots, F_n^*\}$ в пространстве ЛЦФ);

– правило изменения значений F_x^* $\forall x$::

$$(F_x^* \ \forall x)_{æ} \to \{F_x^* \ \forall x\}_{æ+1}. \quad (44)$$

в случае, если при предыдущих величинах F_x^* (на $æ$-й итерации) область $U = \emptyset$.

Требуется найти решение $W^*(W^0)$, обеспечивающее попадание конца вектора $F_x[W^*(W^0)] = \{F_1[W_1^*(W^0)], \dots, F_n[W_n^*(W^0)]\}$ в область U.

Нужная информация (вид свертки, наличие соответствующей терминальной фреймовой[6] сети в информационной базе эргасистемы [7, 8], выражения для правил предпочтения и закона их изменения и др.) или способ ее получения восстанавливается на этапе постановки с участием ЛПР.

Пусть f_x – коэффициенты, отражающие степень близости ЛЦФ $F_x, x = \overline{1,n},$ к своим оптимальным значениям F_x^* и убывающие (в случае минимизации всех ЛЦФ) с ростом $æ$, где $æ$ – номер итерации поиска экстремума (рис. 2). Убывание $f_{x,æ}$ (с ростом $æ$) до предельных значений f_x^*:

$$\lim_{x\to\infty}(f_{x,æ}) = f_x^* \ \forall x \quad (45)$$

характеризует собой ужесточение требований к каждой ЛЦФ, а различный темп убывания Δf_x отдельных коэффициентов $f_{x,æ}$ реализует (в алгоритме) заданное правило предпочтения.

Таким образом, заданные правила предпочтения реализуются при помощи соответствующего выбора начальных значений $f_{x,1}(æ = 1)$, темпа убывания Δf_x и конечных значений параметров f_x^*, $x = \overline{1,n}$. Изменению правил предпочтения соответствует изменение части или всех этих параметров. Применяя матричную запись, правила предпочтения можно полностью задать при помощи $[n \times l]$-матрицы предпочтений (МП) M, где n – число ЛЦФ, а l – количество параметров управления решением (например, три параметра $f_{x,1}, \Delta f_x, f_x^*$).

Тогда закон изменения правил предпочтения можно задать некоторым набором МП: $M_1, M_2, \dots, M_\psi$ или некоторым соотношением X, при помощи которого осуществляется переход от одного правила предпочтения к другому:

$$M_{æ+1} = X(M_{æ}). \quad (46)$$

Если $X(M_{æ})$ представляет собой линейное преобразование (при помощи $[n \times n]$-матрицы B) $M_{æ}$ в $M_{æ+1}$, тогда, сформировав из столбцов матриц $M_{æ}$ и $M_{æ+1}$ (приписав их один под другим) составные векторы $y_{æ+1}$ и $y_{æ}$, можно записать

$$y_{æ+1} = (B \otimes I)y_{æ} = \bar{B} \ y_{æ}, \quad (47)$$

где I – единичная матрица; $\otimes$ – знак прямого произведения матриц.

Зависимость X может иметь более сложный вид [4]:

$$y_{æ+1} = B^n y_{æ} + B^{n-1} y_{æ} + \dots + y_{æ}. \quad (48)$$

Однако при больших значениях n и l даже для восстановления оператора B в (47) требуется получение значительной информации от ЛПР, поэтому более сложные выражения, как, например, (48), использовать на практике нецелесообразно.

[6] Поспелов Д. А. Логико-лингвистические модели в системах управления. М.: Энергоиздат, 1981. 232 с.

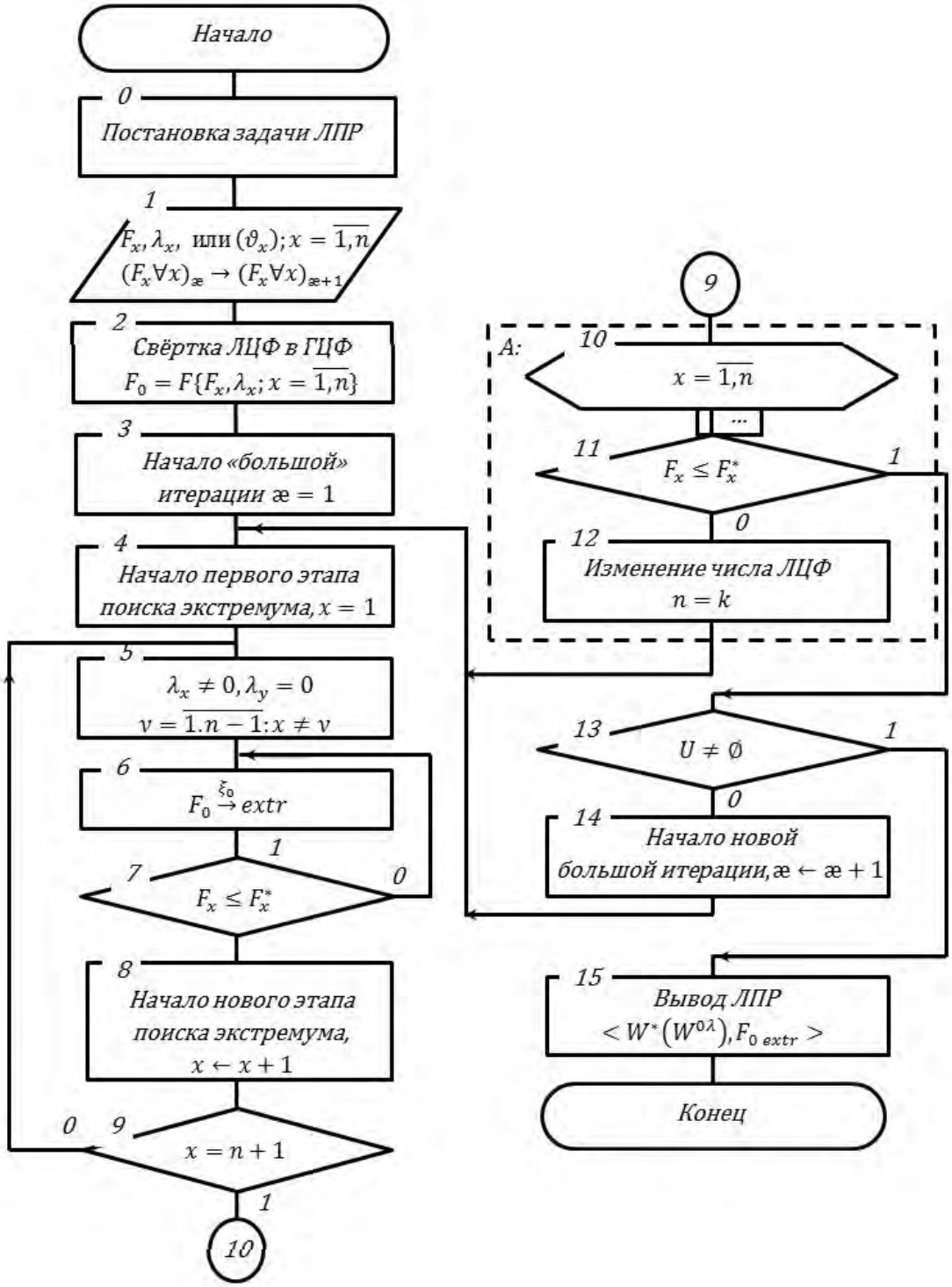

Рис. 3. Схема регулярного алгоритма координации решений периферийных элементов в иерархической сети эргасистемы

На этапе решения сформулированной оптимизационной задачи нет необходимости привлекать оператора (ЛПР), процесс решения полностью автоматизируется, а неопределенность в выборе цели оптимизации состоит в том, что цель оптимизации в ходе решения может изменяться (многократно) ЛПР [5]. Пространство стратегий изменения цели содержит конечное счетное или непрерывное бесконечное множество допустимых стратегий. При $n = 1$ данная задача вырождается в задачу с полной неопределенностью в выборе цели (однокритериальная оптимизация).

С учетом изложенного разработан алгоритм, реализующий регулярные стратегии поиска парето-оптимального с точностью до ε_0 $(|F_0 - F_0^*| \leq \varepsilon_0)$ решения задачи оптимизации координации (АОК-1) локальных решений ПЭ в ИРС и состоящий в следующем (рис. 3):

Шаг 0. Постановка задачи ЛПР оператору-исследователю (блок 0).

Шаг 1. Ввод исходных данных: приоритетных коэффициентов λ_x (или ϑ_x) ЛЦФ $F_x(W^0 = \lambda,\ W_x), x = \overline{1,n}$ и закона (44) изменения правил предпочтений (бл. 1).

Шаг 2. Осуществляется свертка вектора ЛЦФ в скалярную ГЦФ

$$F_0[W(W^0)] = F_0\{F_x, \lambda_x, x = \overline{1,n}\}. \quad (49)$$

Начало первой $(æ = 1)$ большой итерации (бл. 2. 3).

Шаг 3. На первом этапе поиска $x = 1$, все весовые коэффициенты λ_y, кроме λ_x, приравниваются к нулю (бл. 4, 5).

Шаг 4. Осуществляется поиск экстремума (49) с использованием модифицированного (с учетом дискретности альтернатив W) численного метода оптимизации (градиентного, релаксационного, случайного поиска и др.), причем на каждой итерации поиска проверяется условие

$$F_x[W(W^0)] \le F_x. \quad (50)$$

Если условие (50) не выполнено, поиск оптимума продолжается (бл. 6, 7).

Шаг 5. Если выполнено (50), λ_x принимает нулевое значение, а λ_{x+1} ненулевое (бл. 8) и процедура повторяется (начиная с бл. 5), для $x = x + 1$ до выполнения $x = n + 1$ (бл. 9).

Шаг 6. Осуществляется проверка выполнения условий (50) по всем ЛЦФ (модуль A:) и, если не выполнены некоторые из них, реализуется переход к *Шагу* 3, причем λ_x принимает ненулевые значения последовательно для всех $n = k$ ЛЦФ, для которых не выполнялось (50).

Шаг 7. Если (50) выполнено для всех x, определяется , получено ли решение задачи (т.е. $U \neq \emptyset$), в случае отрицательного результата номер «большой» итерации изменяется на единицу: $æ = æ + 1$, осуществляется переход к *Шагу* 3, и алгоритм решает задачу заново при новых ограничениях, т.е. при $\{F_x^*\ \forall x\}_{æ+1}$ (бл. 13, 14).

Шаг 8. Если решение получено, задача решена. Вывод (отображение) паретовской точки $W^*(W^0) \in U$ и значения F_0^* (бл. 15).

Незначительная модификация данного алгоритма позволяет получить ещё один регулярный алгоритм АОК-2 (рис. 4):

Шаги 0...5, 7, 8. Аналогичны соответствующим шагам алгоритма АОК-1.

Шаг 6. Проводится проверка на ненарушение ограничений на ЛЦФ, оптимизация по которым уже осуществлена (бл. 10, 11). Если они нарушены, из свертки (ГЦФ) приравниванием к нулю соответствующих коэффициентов λ_x выбрасываются (в обратной последовательности) ЛЦФ (модуль B:) и осуществляется переход к *Шагу* 4.

В случае если решение, найденное в результате рассмотренных алгоритмов, является неудовлетворительным по одной или нескольким ЛЦФ (с точки зрения ЛПР), оператор (ЛПР) осуществляет перестройку весовых коэффициентов в ГЦФ и повторно решает задачу. Данная процедура может повторяться многократно, и для повышения ее эффективности необходимо применение диалога «ЛПР – ЭВМ».

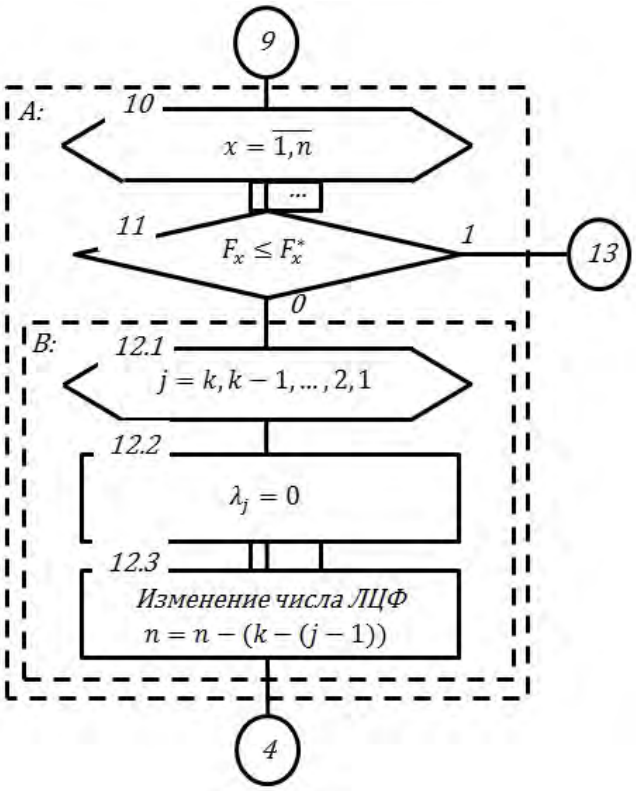

Рис. 4. Фрагмент схемы модифицированного регулярного алгоритма координации решений периферийных элементов

Управление процессом решения путем изменения весовых коэффициентов в ГЦФ может быть затруднено (особенно в нелинейных оптимизационных задачах), поэтому целесообразно в информационно-математическое обеспечение процесса оптимизации координации решений ПЭ включать алгоритмы восстановления зависимости $\lambda_x(F_x^*,\ \Delta F_x^*)$, что позволит ЛПР сформулировать требования к качеству решения в терминах допустимых отклонений от оптимума и реализовать эти требования путем перестройки весовых коэффициентов. В [4], например, для восстановления зависимости $\lambda_x(F_x^*,\ \Delta F_x^*)$, используются непараметрические процедуры.

Рандомизированный алгоритм оптимальной координации решений периферийных элементов

Теперь допустим, что при постановке задачи не сформулированы правила предпочтения, которые отражает МП M, и не формализован закон изменения правил предпочтения, т.е. правило перехода от $M_æ$ к $M_{æ+1}$. В случае, если на предыдущей итерации (при $M = M_æ$) решение, отвечающее правилам предпочтения $M_æ$, отсутствует, тогда для доопределения задач такого типа необходимо поставить эксперимент, в котором в процессе диалога «ЛПР – КСА» осуществляется набор (на игровых примерах или в процессе решения задачи) реализаций $M_1, M_2, \dots, M_\psi, \dots$. Поскольку при использовании предложенных регулярных алго-

ритмов (АОК-1, АОК-2) результат решения однозначно связан с видом МП, то для восстановления последовательности $M_1, M_2, \dots, M_\psi, \dots$ нет необходимости каждый раз решать оптимизационную задачу.

Можно организовать процедуру (модуль A: на рис. 5) случайной генерации результатов решений $W^{(1)}, W^{(2)}, \dots, W^{(j)}, \dots$ (бл. 3), которая должна формировать последовательность наборов ЛЦФ $F_1^{(1)}, \dots, F_n^{(1)}; F_1^{(2)}, \dots, F_n^{(2)}; \dots; F_1^{(j)}, \dots, F_n^{(j)}; \dots$ (бл. 4) и соответствующую им последовательность МП $M_1, \dots, M_j, \dots$ (бл. 5). После отбраковки (бл. 6) ЛПР абсолютно неприемлемых решений и расстановки оставшихся реализаций в порядке возрастания степени их непригодности, из МП формируется последовательность $M_1, \dots, M_\psi, \dots$, в соответствии с порядком расстановки отобранных решений (бл. 10). Однако при оценке качества отдельных решений в силу различных объективных и субъективных факторов мнение ЛПР даже относительно одной и той же реализации может в какой-то степени измениться. Различными будут и оценки разных экспертов.

Поэтому, когда получено первое приближение последовательности $M_1, M_2, \dots, M_\psi, \dots$ (бл. 10) и соответствующих им наборов решений, предлагается осуществить следующую процедуру (модуль C:) рандомизации и последующего сглаживания (подобно тому, как это сделано в [4]). Строится ряд последовательностей (бл. 12):

$$F_1^{(1)} + \delta_{1s}^{(1)}, \dots, F_n^{(1)} + \delta_{ns}^{(1)};$$
$$F_1^{(2)} + \delta_{1s}^{(2)}, \dots, F_n^{(2)} + \delta_{ns}^{(2)}; \dots; F_1^{(j)} + \delta_{1s}^{(j)}, \dots, F_n^{(j)} + \delta_{ns}^{(j)}; \dots, \quad (51)$$

где $\delta_{xs}^{(k)}, x = \overline{1,n}; k = \overline{1,j}$ – последовательность независимых случайных величин, малых (по абсолютной величине) по сравнению со значениями ЛЦФ, с которыми они суммируются.

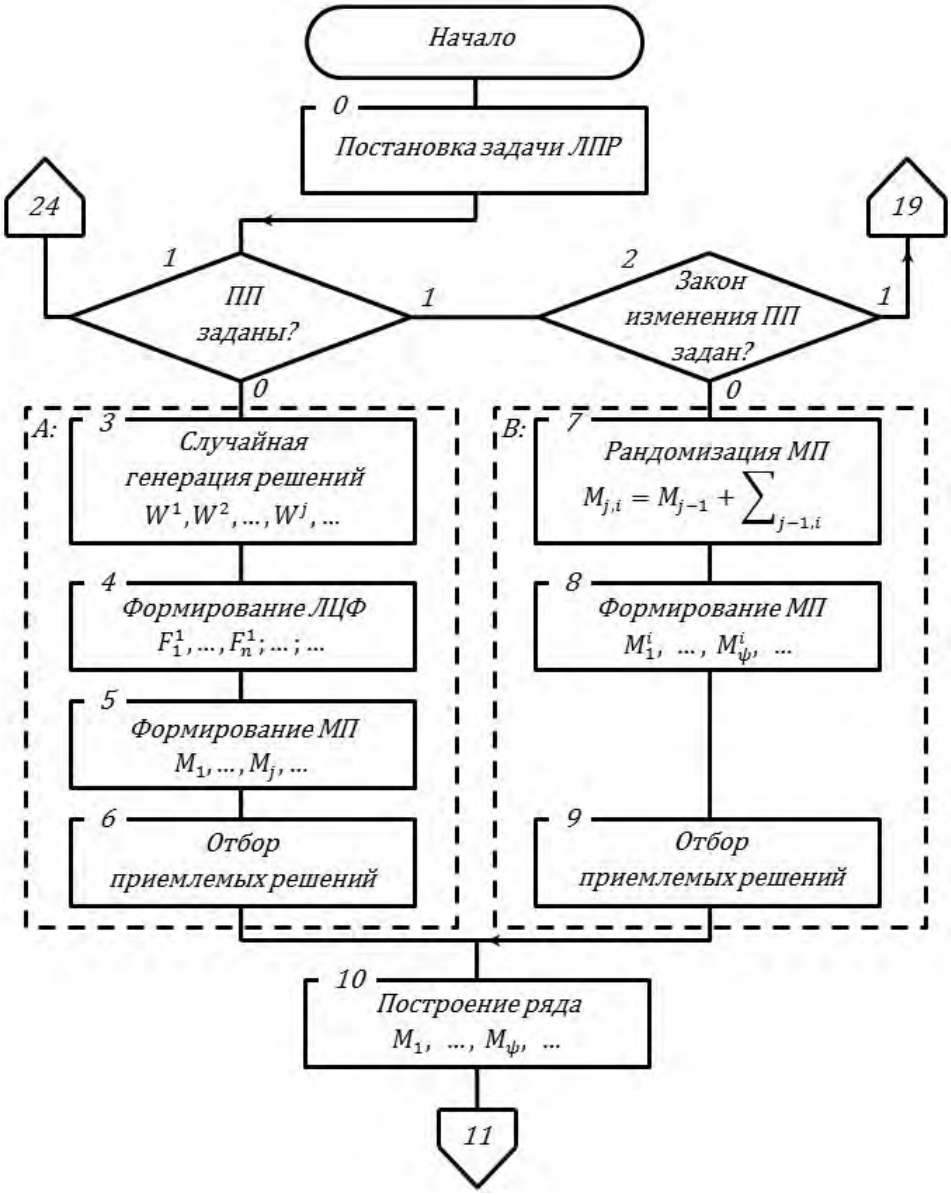

Рис. 5. Схема рандомизированного алгоритма координации решений периферийных элементов в иерархической ИРС

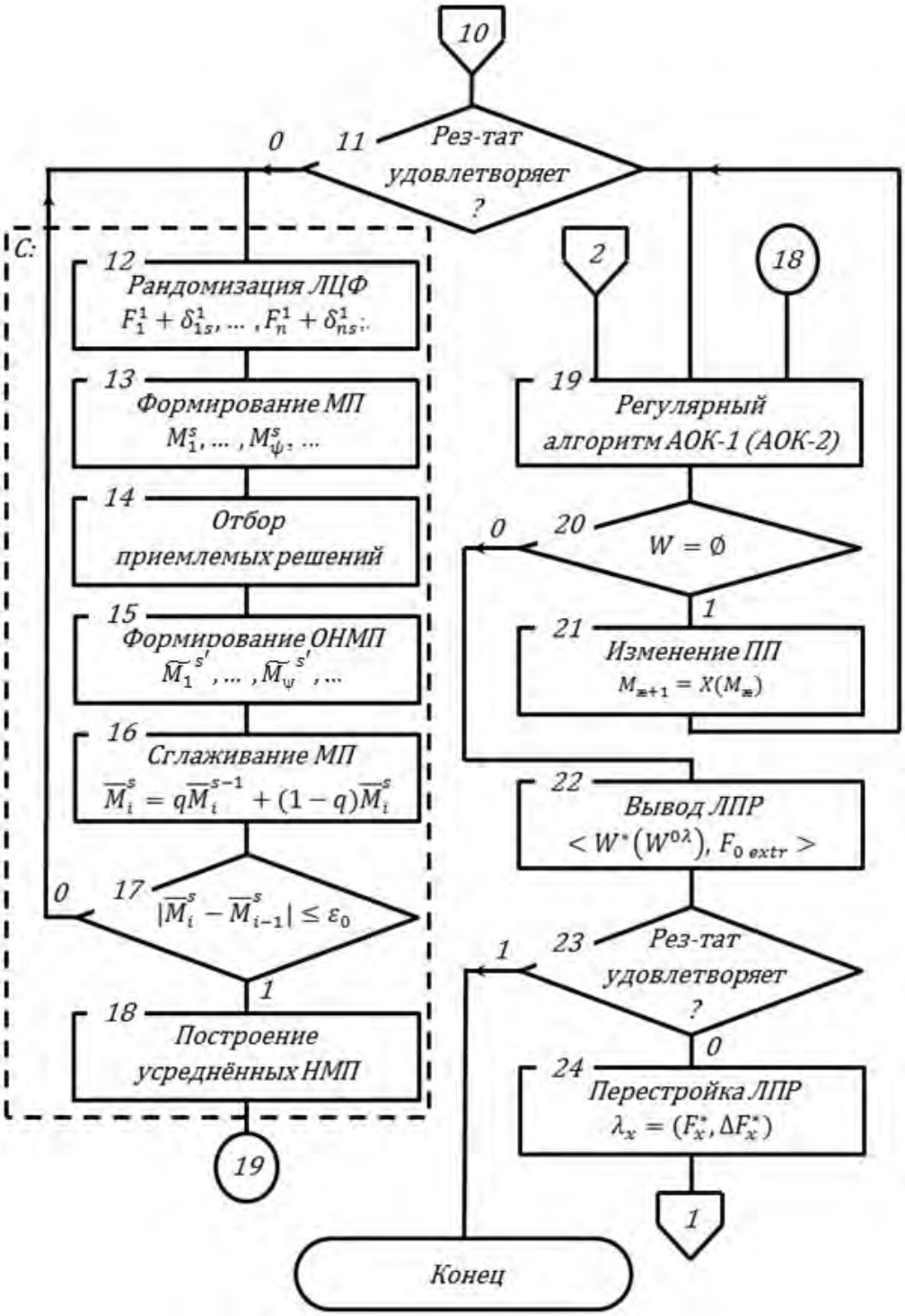

Рис. 5. (окончание)

Каждой последовательности $s = 1, \dots, p$ в (51) ставится в соответствие последовательность $M_1^s, \dots, M_\psi^s, \dots$ (бл. 13), они предъявляются ЛПР (или группе экспертов), который вновь выстраивает иерархию решений по степени их предпочтительности (бл. 14).

Соответствующим образом осуществляется и перестановка членов в рядах $M_1^s, \dots, M_\psi^s, \dots$ в результате чего получаем откорректированные наборы матриц предпочтений (ОНМП) $\widetilde{M}_1^{s'}, \dots, \widetilde{M}_\psi^{s'}, \dots$ (бл. 15), в общем случае не совпадающие с исходным рядом. Затем путем сглаживания результатов эксперимента при помощи соотношений

$$\overline{M}_i^s = q\overline{M}_i^{s-1} + (1-q)\overline{M}_i^s, i = \overline{1,\psi} \qquad (52)$$

получаем ряд усредненных МП $\overline{M}_i^s$ (бл. 18). Процедура прекращается, когда дальнейшие итерации (52) не приводят к существенному $(> \varepsilon_0)$ изменению сглаженных значений $\overline{M}_i^s$ (бл. 17).

В результате имеем последовательность $\overline{M}_i^s, i = \overline{1,\psi}$ которая является носителем закона из-

менения правил предпочтения и может использоваться при формировании решающих правил.

Если МП $\overline{M_i}^s$ при реализации регулярных алгоритмов АОК-1, АОК-2 (бл. 19) не обеспечивает нахождение отвечающего ей решения (решение задачи при $M = \overline{M_i}^s$ отсутствует), осуществляется повторный поиск решения при $M = \overline{M}_{i+1}^s$ (бл. 20, 21). Если ряд $\overline{M_i}^s, i = \overline{1, \psi}$ допускает достаточно простую аппроксимацию (например, типа (47)), то в целях экономии объема машинной (КСА) памяти можно, используя любой из известных методов идентификации [14], восстановить оператор $\overline{B}$. Тогда при переходе от $\overline{M_i}^s$ к $\overline{M}_{i+1}^s$ используется процедура (47) (бл. 21).

Рассмотрим случай, когда сформулированы правила предпочтения, т.е. на этапе постановки задачи выработаны правила, позволяющие заполнить МП M. В этом случае МП M может использоваться в качестве исходной для построения кортежа $M_1, \dots, M_\psi$ матриц, описывающего закон изменения правил предпочтения. Процедура (модуль B:) восстановления последовательности $M_1, \dots, M_\psi$ может осуществляться путем последовательной рандомизации (бл. 7, 8) матриц:

$$M_j = \mathrm{sat}\left(M_{j,i}\right);\ M_{j,i} = M_{j-1} + \sum\nolimits_{j-1,i} \square\ ; \qquad (53)$$
$$M_{j=i} = M;\ \ i = \overline{1, \sigma};\ j = \overline{1, \psi}\,,$$

где $\sum_{j-1,i} \square$ – матрица рандомизации со случайными элементами; i – номер случайной реализации матрицы $\sum \square$; $M_j = \mathrm{sat}\,(\cdot)$ – условная запись, означающая выбор ЛПР из набора МП $M_{j,i}$, рандомизированных матрицей наиболее приемлемой МП (бл. 9, 10).

Рандомизированный алгоритм оптимизации координации локальных решений ПЭ в сети эргасистемы является эффективным (обладают свойством сходимости или результативности) на множестве задач координации, определяемом исходными условиями (42), (43). *Сходимость* алгоритма, реализующего рандомизированные стратегии оптимальной координации в соответствии с приведенной схемой, обеспечивается использованием конечных значений параметров матриц (правил) предпочтений, а также сходимостью регулярных алгоритмов, используемых для непосредственного поиска глобального парето-оптимального решения. *Массовость* алгоритма обеспечивается его инвариантностью к видам ЛЦФ и к виду зависимости, при помощи которой задается закон изменения правил предпочтений.

Заключение

На практике переход от содержательного описания задачи к соответствующему *математическому* представлению и последующей реализации на средствах ЭВМ часто осуществляется неудовлетворительно [1], так как используются примитивные идеализированные модели, в недостаточной мере учитывающие реальные ограничения и требования к качеству задач и др. Для устранения этих недостатков применяются методы системного анализа в сочетании с современными численными алгоритмами оптимизации на основе методологии структурно-математического подхода [9, 13].

Основным понятием структурно-математического подхода является понятие *рода математической структуры* (РМС), который определяется введением базисных множеств и набора отношений, строящихся на так называемых ступенях шкалы множеств [13] и удовлетворяющих определённым аксиомам. Ступени шкалы множеств образуются из базисных множеств с помощью операций взятия декартовых произведений или булеанов. Путём наделения базисных множеств определёнными конкретными математическими свойствами осуществляется переход к *конкретным математическим структурам* (КМС). Если же базисные множества и отношения получают реальную интерпретацию, позволяющую считать данную КМС отражением реальной эргасистемы (функциональной подсистемы, АСУ) или процессов в последней, то эта КМС представляет собой *структуру математической модели* (СММ) реальной эргасистемы.

Методологическая схема «РМС ⇨ КМС ⇨ СММ» позволяет выявить связи между конструкциями математики, использующими определённый уровень абстракции, и математическими моделями реальных систем [9, 13]. Последние могут носить как *формальный* (числовой), так и (а это очень важно для системных приложений) *неформальный* (нечисловой) характер, что позволит обеспечить тесное взаимодействие математики и смежных отраслей, таких, как теория систем, кибернетика, теория принятия решений. Информационно-кибернетические представления (понятия) при этом оказываются связанными с такими основополагающими математическими понятиями, как *отображение, математическая структура, эквивалентность, упорядочение, связность, композиция и декомпозиция, морфизмы* и др. (опираются на концепции современной математики, её определенную архитектуру), обеспечивая необходимый уровень их математизации.

Рассмотренные обоснованные принципы и разработанные модели и алгоритмы позволяют вырабатывать глобальные парето-оптимальные планы распределения средств, ресурсов и ЗПИ в иерархической ИРС эргасистемы в условиях информационной неопределенности различного уровня [8]. Они являются базовыми для создания соответствующего эффективного информационно-математического обеспечения [10, 15, 16] крупномасштабных эргасистем типа интегрированных АСУ сложными объектами ракетно-космической техники, ГАС «Правосудие», ГАС «Выборы» и др.

Рецензент: ***Омельченко Виктор Валентинович****, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники РСФСР, советник секретариата научно-технического совета ВПК «НПО Машиностроения», г. Москва. E-mail: omvv@yandex.ru*

Литература

1. Бусленко Н. П. Моделирование сложных систем. М.: Наука, 1978. 399 с.
2. Гермейер В. Б. Игры с непротивоположными интересами. М.: Наука, 1976. 328 с.
3. Информатизация управления: Монография / Под ред. Д. А. Ловцова. М.: ВА им. Петра Великого, 2003. – 263 с.
4. Кебец Е. П. Об одном классе алгоритмов оптимизации при векторном критерии качества // Модели и алгоритмы принятия решений в автоматизированных системах. Фрунзе: Илим, 1977. С. 45 – 53.
5. Кузьмин Е. А. Неопределенность и определенность в управлении организационно-экономическими системами. Екатеринбург: Ин-т экономики УрО РАН, 2012. 184 с.
6. Ловцов Д. А. Основные методологические понятия, концептуальные принципы и теоретико-прикладные положения правовой информатики // Правовая информатика. – 2018. – № 3. – С. 4 – 15. DOI: 10.21681/1994-1404-2018-3-4-15
7. Ловцов Д. А. Информационная теория эргасистем: основные положения // Правовая информатика. – 2019. – № 3. – С. 4 – 20. DOI: 10.21681/1994-1404-2019-3-4-16
8. Ловцов Д.А. Теоретические основы системной информатизации правового регулирования // Правовая информатика. – 2019. – № 4. – С. 12 – 28. DOI: 10.21681/1994-1404-2019-4-12-28.
9. Ловцов Д. А. Системный анализ. Часть. 1. Теоретические основы. – М.: РГУП, 2018. – 224 с. ISBN 978-5-93916-701-7
10. Ловцов Д. А. Ситуационное планирование процесса переработки измерительной информации в сети АСУ // Теория и системы управления – 1995. – № 5. – С. 239 – 247.
11. Моисеев Н. Н. Математические задачи системного анализа. М.: Наука, 1982. 250 с.
12. Ногин В. Д. Сужение множества Парето: аксиоматический подход. М.: Физматлит, 2016. – 272 с.
13. Резников Б. А. Анализ и оптимизация сложных систем. Планирование и управление в АСУ. Л.: ВИА им. А.Ф. Можайского, 1981. 148 с.
14. Цыпкин Я. З. Информационная теория идентификации. М.: Наука, 1995. 336 с.
15. Lovtsov D. A., Karpov D. S. Dynamic Planning of Navigation Determinations of Airspace and Missile Objects in an Automated Flight Test Control System // Solar System Research RAS. 2011. Vol. 45. No 7. Pp. 645 – 651.
16. Lovtsov D. A., Loban A. V. An effective new technology for distributed processing of measurement data by S/C automated control system // Solar System Research. RAS. 2015. Vol. 49. No 7. Pp. 1 – 7.

MODELLING THE ORGANISATION OF INFORMATION PROCESSING IN A HIERARCHICAL ERGASYSTEM

Dmitrii Lovtsov, *Dr.Sc. (Technology), Professor, Meritorious 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, Russian Federation, Moscow.*
E-mail: *dal-1206@mail.ru*

Keywords: *information processing, hierarchical ergasystem, situational planning, information uncertainty, Pareto optimality, mathematical structures, mathematical model, optimal coordination, regular algorithm, randomised algorithm, situational selection function.*

Abstract.
Purpose of the work: *improving the scientific and methodological basis of the legal informatics theory.*
Methods used: *system analysis and mathematical modelling of the problem situation of decision making for organising information processing, formal logical development of algorithms for coordination planning of information processing.*
Results obtained: *principles of coordination planning of information processing which prescribe the need to consider situational uncertainty factors for each new solving of the planning problem are justified. A mathematical structure of the model of the problem situation of decision making for organising information processing in a two-level hierarchical ergasystem is determined. A multi-level algorithm for rational situational planning of information processing, regular and randomised algorithms for optimal coordination of solutions for peripheral elements ensuring working out global Pareto-optimal plans for distributions of funds, resources and information processing tasks in a hierarchical information distribution network of the ergasystem under the conditions of information uncertainty at various levels are developed.*
The results obtained are basic for setting up appropriate efficient mathematical information support for large-scale ergasystems such as integrated automated control systems of rocket and space equipment, government automated systems "Justice", "Elections", etc.

References

1. Buslenko N. P. Modelirovanie slozhnykh sistem. M. : Nauka, 1978, 399 pp.
2. Germeier V. B. Igry s neprotivopolozhnymi interesami. M. : Nauka, 1976, 328 pp.
3. Informatizatsiia upravleniia : monografiia. Pod red. D. A. Lovtsova. M. : VA im. Petra Velikogo, 2003, 263 pp.
4. Kebets E. P. Ob odnom klasse algoritmov optimizatsii pri vektornom kriterii kachestva. Modeli i algoritmy priniatiia reshenii v avtomatizirovannykh sistemakh. Frunze : Ilim, 1977, pp. 45-53.
5. Kuz'min E. A. Neopredelennost' i opredelennost' v upravlenii organizatsionno-ekonomicheskimi sistemami. Ekaterinburg : In-t ekonomiki UrO RAN, 2012, 184 pp.
6. Lovtsov D. A. Osnovnye metodologicheskie poniatiia, kontseptual'nye printsipy i teoretiko-prikladnye polozheniia pravovoi informatiki. Pravovaia informatika, 2018, No. 3, pp. 4-15. DOI: 10.21681/1994-1404-2018-3-4-15 .
7. Lovtsov D. A. Informatsionnaia teoriia ergasistem: osnovnye polozheniia. Pravovaia informatika, 2019, No. 3, pp. 4-20. DOI: 10.21681/1994-1404-2019-3-4-16 .
8. Lovtsov D.A. Teoreticheskie osnovy sistemnoi informatizatsii pravovogo regulirovaniia. Pravovaia informatika, 2019, No. 4, pp. 12-28. DOI: 10.21681/1994-1404-2019-4-12-28 .
9. Lovtsov D. A. Sistemnyi analiz. Chast'. 1. Teoreticheskie osnovy. M. : RGUP, 2018, 224 pp. ISBN 978-5-93916-701-7.
10. Lovtsov D. A. Situatsionnoe planirovanie protsessa pererabotki izmeritel'noi informatsii v seti ASU. Teoriia i sistemy upravleniia, 1995, No. 5, pp. 239-247.
11. Moiseev N. N. Matematicheskie zadachi sistemnogo analiza. M. : Nauka, 1982, 250 pp.
12. Nogin V. D. Suzhenie mnozhestva Pareto: aksiomaticheskii podkhod. M. : Fizmatlit, 2016, 272 pp.
13. Reznikov B. A. Analiz i optimizatsiia slozhnykh sistem. Planirovanie i upravlenie v ASU. L. : VIA im. A.F. Mozhaiskogo, 1981, 148 pp.
14. Tsypkin Ia. Z. Informatsionnaia teoriia identifikatsii. M. : Nauka, 1995, 336 pp.
15. Lovtsov D. A., Karpov D. S. Dynamic Planning of Navigation Determinations of Airspace and Missile Objects in an Automated Flight Test Control System. Solar System Research, RAS, 2011, vol. 45, No, 7, rp. 645-651.
16. Lovtsov D. A., Loban A. V. An effective new technology for distributed processing of measurement data by S/C automated control system. Solar System Research, RAS, 2015, vol. 49, No. 7, rp. 1-7.