

Комбинированный алгоритм многокритериального синтеза технологий управления информационной системой виртуального предприятия *

Е. М. Зайчик¹, А. В. Иконникова²,
И. А. Петрова³, С. А. Потрясаев⁴

Рассмотрена совместная постановка и комбинированный алгоритм решения многокритериальной задачи оптимального оперативного перераспределения функций управления бизнес-процессами между элементами и подсистемами информационной системы (ИС) виртуального предприятия (ВП) и задачи программного управления и упорядочения соответствующих структурных состояний ИС ВП.

Введение

Одной из таких наиболее перспективных организационных форм современных производственно-транспортных сетей являются ВП, представляющие собой организации, формируемые из географически распределенных независимых многопрофильных партнеров (реальных предприятий), объединенных в единую организационно-техническую структуру на основе информационно-телекоммуникационных технологий на время выполнения совместного заказа [1–3].

Основное предназначение ВП состоит во временном совместном динамическом использовании различными физическими и юридическими лицами части своих ресурсов с целью получения каждым из них прибыли в ходе решения общей производственной задачи. Всесторонний анализ процессов создания и функционирования современных интегрированных про-

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 07-07-00169), программы фундаментальных научных исследований ОИТВС РАН (проект 2.5).

¹ 199178, Санкт-Петербург, 14 линия В. О., д. 39, СПИРАН, zaem@mail.ru

² 199178, Санкт-Петербург, 14 линия В. О., д. 39, СПИРАН, ikonnikova@iias.spb.su

³ 199178, Санкт-Петербург, 14 линия В. О., д. 39, СПИРАН, irina.999@list.ru

⁴ 199178, Санкт-Петербург, 14 линия В. О., д. 39, СПИРАН, semp@mail.ru

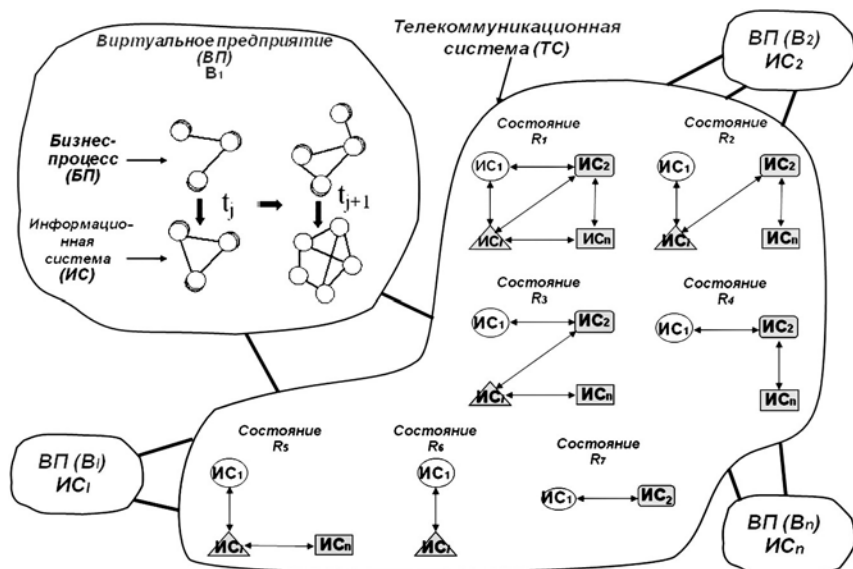


Рис. 1.1. Возможные варианты сценариев структурной динамики

изводственно-транспортных предприятий (в том числе и ВП), показывает, что указанные организации как *объекты управления* характеризуются высокой структурной динамикой. Поэтому при их проектировании и использовании необходимо уметь оперативно решать ряд важнейших задач структурно-функционального синтеза их облика. К данным задачам, в первую очередь, могут быть отнесены: задачи выбора партнеров (например, производителей и поставщиков комплектующих изделий и конечной продукции); задачи конфигурирования заказа; задачи размещения заказа; задачи конфигурирования транспортной сети и информационно-технологических ресурсов [1–2].

Важнейшей подсистемой любого ВП является ее интегрированная информационная система (ИИС), образованная на основе оперативного конфигурирования (структурно-функционального синтеза) ИС, обеспечивающих функционирование как каждого реального предприятия, входящего во временную кооперацию, так и их взаимодействие в процессе производственной деятельности. Необходимо отметить, что для ИИС также как и ВП характерна структурная динамика, вызванная различными причинами (объективными, субъективными, внутренними, внешними и т. п.) [4]. На рис. 1.1 в графическом виде представлены возможные варианты сценариев структурной динамики применительно к современным ИС.

Ранее проведенные исследования показали, что в целях повышения (сохранения) уровня работоспособности и возможностей ИИС либо бес-

печения наилучших условий деградации указанных систем необходимо осуществлять управление их структурами (в том числе управление реконфигурацией структур ИИС). В настоящее время существуют различные варианты управления структурной динамикой ИИС. Среди них можно выделить, в первую очередь [4]: изменение способов, целей функционирования ИИС, их содержания, последовательности выполнения в различных условиях; перемещение в пространстве отдельных элементов и подсистем ИИС; перераспределение и децентрализация функций, задач, алгоритмов управления, информационных потоков между уровнями ИИС; использование гибких (сокращенных) технологий управления ИИС; реконфигурация структур ИИС при их деградации. Задачи управления структурной динамикой ИИС по своему содержанию относятся к классу задач структурно-функционального синтеза облика ИИС и формирования соответствующих программ управления их развитием [4–8]. В предлагаемой статье рассматривается одна из задач управления структурной динамикой ИИС, которая связана с оперативным формированием и реализацией технологии планирования как бизнес-процессов ВП, так и собственно работ, проводимых в ИИС и обеспечивающих качественную реализацию бизнес-процессов.

1. Постановка задачи

Процесс функционирования современных ИИС характеризуется высокой интенсивностью изменения как условий выполнения бизнес-процессов ВП, так и содержанием задач, связанных с реализацией соответствующих информационных процессов.

Для того, чтобы в указанных условиях ИИС успешно выполняла все поставленные задачи, необходимо для каждой ИИС разрабатывать гибкие способы их применения, позволяющие в зависимости от складывающейся обстановки оперативно осуществлять перераспределение целей, функций и решаемых задач (алгоритмов) между элементами, подсистемами, уровнями ИИС. К таким задачам можно в первую очередь отнести: задачи приёма, передачи, хранения, обработки, формирования, планирования и управления как ВП в целом, так и ее ИИС.

При перераспределении данных задач между аппаратно-программными комплексами, расположенными в узлах ИИС ВП, наряду с оценением и анализом эффективности применения ИИС необходимо каждый раз проводить согласование выбранных способов реализации бизнес-процессов в соответствующих подсистемах ВП с целевыми и информационно-технологическими возможностями ИИС. Указанная особенность организации процессов автоматизированного управления бизнес-процессами связана с тем, что каждому такому процессу в соответствующем узле ВП должна

соответствовать своей структуре информационной подсистемы данного узла, входящей в состав глобальной ИИС и, как следствие, свои варианты организации информационных потоков в контурах управления, реализованных на заданной аппаратно-программной архитектуре ИИС.

С формальной точки зрения задача выбора (синтеза) как структуры бизнес-процессов конкретного ВП, так и задача оперативного структурно-функционального синтеза облика самой ИИС предполагает одновременно проведение многокритериальной оптимизации процесса функционирования ВП и ее ИИС, а также перераспределение функций управления бизнес-процессами по узлам рассматриваемой информационной системы и выбор их состава. Дополнительная особенность рассматриваемой задачи (по сравнению с вариантом, предложенным в работах [6–7]), состоит в том, что её решение должно проводиться оперативно в условиях жёстких временных ограничений, связанных с процессом применения ИИС ВП по целевому назначению.

Задача оперативного распределения (перераспределения) функций управления может решаться на различных этапах реализации бизнес-процессов. Для определённости в данной статье рассмотрим случай, когда исследуемая задача решается на этапе планирования применения ИИС ВП, в ходе которого происходит одновременно предварительное распределение функций управления бизнес-процессами между основными элементами и подсистемами ИИС ВП и формирование программ управления ими.

На этапе оперативного управления (этапе реализации плана) полученные ранее управляющие воздействия могут корректироваться как путём ввода заранее запланированных резервов, так и на основе изменения ранее составленного плана распределения функций управления и выполнения технологических операций, либо при реконфигурации соответствующих структур ИИС ВП.

При постановке задачи оперативного планирования распределения функций в ИИС ВП будем предполагать, что нам известны следующие множества: $A = \{A_i, I \in N = \{1, \dots, n\}\}$ — множество бизнес-процессов (и соответствующих функций управления ими), которые необходимо реализовать в какой-либо подсистеме (узле) ИИС ВП на заданном интервале времени $T = (t_0, t_f]$. Реализация бизнес-процессов гарантирует успешное достижение целей, поставленных перед ВП на интервале времени T . Говоря о функциях управления бизнес-процессами, будем, прежде всего, различать функцию целеполагания, планирования (долгосрочного, оперативного), оперативного управления, контроля, учёта, оценивания и анализа состояния ВП, складывающейся обстановки, функцию координации. С множеством $A = \{A_i, I \in N\}$ непосредственно связано множество информационно-технологических операций

$$D^{(i)} = \left\{ D_{\delta}^{(i)}, \delta \in K = \{1, \dots, s_i\} \right\},$$

выполнение которых гарантирует успешную реализацию бизнес-процесса A_i , $i = 1, \dots, n$; множество основных элементов и подсистем (узлов) ИИС ВП, обозначим его через $B = \{B_j, j \in M = \{1, \dots, m\}\}$; также введём в рассмотрение множество технических комплексов

$$C^{(j)} = \left\{ C_{\lambda}^{(j)}, \lambda \in L = \{1, \dots, l\} \right\}$$

(например: серверов, рабочих станций и т. п., с соответствующим программно-математическим и информационным обеспечением, входящих в состав B_j подсистемы. На данных технических комплексах в B_j может быть реализована та или иная функция (функции) управления конкретным бизнес-процессом.

Будем считать известной матричную функцию $E(t) = \|\epsilon_{ij}(t)\|$, элементы которой представляют собой функции Хевисайта. При этом пусть $\epsilon_{ij}(t) = 1$, если пространственно-временные и технические ограничения позволяют в момент времени t реализовать в подсистеме B_j функцию A_j ; $\epsilon_{ij}(t) = 0$ в противоположном случае. Пусть информационное взаимодействие в техническом комплексе ИИС ВП осуществляется по дуплексным каналам связи (телефонным, телеграфным, радиоканалам).

На рис. 1.1 для примера представлены семь возможных структурных состояний ИИС ВП, в которых может находиться данная система и её элементы в процессе применения по целевому назначению. На данном рисунке стрелками показаны варианты информационного взаимодействия этих элементов между собой. Указанные варианты соответствуют различным способам применения ИИС ВП, различному пространственному расположению её элементов и подсистем друг относительно друга.

Содержательная постановка задачи оперативного планирования распределения и реализации функций управления между техническими комплексами ИИС ВП сводится к следующему: необходимо (с учётом перечисленных исходных данных известных пространственно-временных, технических и технологических ограничений) для каждого из заданных структурных состояний R_1, R_2, \dots, R_x ИИС ВП найти наилучшие варианты закрепления функций управления за её элементами и подсистемами, варианты планов выполнения технологических операций, обеспечивающих реализацию функций управления, а также произвести упорядочение перечисленных структурных состояний ИИС ВП в порядке их предпочтительности. Задание отношения предпочтения будет осуществляться с помощью

показателей эффективности функционирования ИИС ВП, её структурно-технологические характеристики.

Сформулированная задача относится к классу задач многокритериального выбора на конечном множестве альтернатив, в качестве которых рассматриваются структурные состояния ИИС ВП.

2. Комбинированный алгоритм решения многокритериальной задачи комплексного планирования работ в информационной системе виртуального предприятия

Алгоритм решения поставленной задачи включает в себя следующие шаги.

Шаг 1. На аналитических (имитационных, аналитико-имитационных) моделях для каждого из заданных структурных состояний R_1, R_2, \dots, R_χ проводится оптимальное распределение бизнес-процессов и соответствующих функции управления между подсистемами (узлами) ИИС ВП, планирование выполнения технологических операций, обеспечивающих успешную реализацию данных процессов, и расчёт показателей эффективности функционирования ИИС ВП, в качестве которых могут быть выбраны: общее число функций управлений бизнес-процессами, реализованных в её подсистемах на интервале T , общее число бизнес-процессов, находящихся в заданных макросостояниях, общее число технологических операций, выполненных на интервале T , общая продолжительность реализации всех заданных функций управления на интервале T . В случае учёта факторов неопределённости данные показатели имеют уже вероятностно-статистическую либо нечётко-возможностную интерпретацию [4, 10].

Для количественного оценивания перечисленных показателей рассмотрим следующую модель, в основу которой положена динамическая интерпретация процессов перераспределения функций управления в ИИС ВП и процессов выполнения соответствующих технологических операций [4, 5, 8]:

$$x_i^{(\phi)} = \sum_{j=1}^m \varepsilon_{ij}^{(\phi)}(t) u_{ij}^{(\phi)} ; x_{i\delta j}^{(0)} = \sum_{\lambda=1}^l b_{i\delta j\lambda}^{(0)} u_{i\delta j\lambda}^{(0)} ; y_{ij}^{(\phi)} = v_{ij}^{(\phi)}, \quad (2.1)$$

$$\sum_{j=1}^m u_{\alpha}^{(\phi)} \left[\sum_{\alpha \in \Gamma_{i1}} \left(a_{\alpha}^{(\phi)} - x_{\alpha}^{[\phi]} \right) + \prod_{\beta \in \Gamma_{i2}} \left(a_{\gamma}^{(\phi)} - x_{\lambda}^{(\phi)} \right) \right] = 0, \quad (2.2)$$

$$\sum_{\lambda=1}^l u_{i\delta j\lambda}^{(0)} \left[\sum_{v \in \Gamma_{i\delta 1}} \begin{pmatrix} (0) & (0) \\ a_{ivj} & -x_{ivj} \end{pmatrix} + \prod_{\mu \in \Gamma_{i\delta 2}} \begin{pmatrix} (0) & (0) \\ a_{i\mu j} & -x_{i\mu j} \end{pmatrix} \right] = 0, \quad (2.3)$$

$$\sum_{i=1}^n u_{ij}^{(\phi)}(t) \leq 1; \forall j; \sum_{j=1}^m u_{ij}^{(\phi)}(t) \leq 1; \forall i; u_{ij}^{(\phi)}(t) \in \{0, 1\}, \quad (2.4)$$

$$\sum_{j=1}^m \sum_{\lambda=1}^l u_{i\delta j\lambda}^{(0)}(t) \leq 1, \forall i, \forall \delta; \sum_{i=1}^n \sum_{\delta=1}^s u_{i\delta j\gamma}^{(0)}(t) \leq 1, \forall i, \forall \delta; u_{i\delta j\gamma}^{(0)}(t) \in \left\{ 0, u_{ij}^{(\phi)} \right\}, \quad (2.5)$$

$$v_{ij}^{(\phi)} \begin{pmatrix} (0) & (0) \\ a_{isj} & -x_{isj} \end{pmatrix} = 0; v_{ij}^{(\phi)}(t) \in \{0, 1\}, \quad (2.6)$$

$$x_i^{(\phi)}(t_0) = x_{i\delta j}^{(0)}(t_0) = y_{ij}^{(\phi)}(t_0) = 0, \quad (2.7)$$

$$x_i^{(\phi)}(t_f) = a_i^{(\phi)}; \left(a_{i\delta j}^{(0)} - x_{i\delta j}^{(0)}(t_f) \right) y_{ij}^{(\phi)}(t_f) = 0; y_{ij}^{(\phi)}(t_f) \in R^1, \quad (2.8)$$

$$J_0 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m v_{ij}^{(\phi)}(t_f); J_1 = \sum_{i=1}^n v_{ni}^{(\phi)}(t_f); J_2 = T - \sum_{i=1}^m y_{nj}^{(\phi)}, \quad (2.9)$$

где $x_i^{(\phi)}(t)$ — переменная, значение которой в момент времени t равняется текущей длительности реализации бизнес-процесса A_i в подсистеме B_j для

ситуации, когда $u_{ij}^{(\phi)}(t) = 1$; $x_{i\delta j}^{(0)}$ — переменная, характеризующая состояние

выполнения технологической операции $D_{\delta}^{(i)}$; $y_{ij}^{(\phi)}$ — переменная, численно равная длительности интервала времени от момента завершения реали-

зации A_i в подсистеме B_j до момента $t = t_j$; $a_{\alpha}^{(0)}$, $a_{\alpha}^{(0)}$, $a_{\gamma}^{(0)}$, $a_{ivj}^{(0)}$, $a_{i\mu j}^{(0)}$ — заданные величины (краевые условия), значения которых должны (либо могут)

принять соответствующие переменные $x_i^{(\phi)}(t)$, $x_{\alpha}^{(\phi)}(t)$, $x_{\gamma}^{(\phi)}(t)$, $x_{ivj}^{(0)}(t)$, $x_{i\mu j}^{(0)}(t)$

в конце интервала планирования в момент времени $t = t_j$; $u_{ij}^{(\phi)}$, $u_{i\delta j\lambda}^{(0)}$,

$v_{ij}^{(\phi)}$ — управляющие воздействия, при этом $u_{ij}^{(\phi)}(t) = 1$, если A_i реализуется в подсистеме B_j , $u_{ij}^{(\phi)}(t) = 0$ в противоположном случае; $u_{i\delta j\lambda}^{(0)}(t) = 1$, если технологическая операция $D_{\delta}^{(i)}$ выполняется на техническом комплексе $C_{\lambda}^{(j)}$, $u_{i\delta j\lambda}^{(0)}(t) = 0$ в противоположном случае; $v_{ij}^{(\phi)} = 1$, если A_i был реализован в подсистеме B_j , $v_{ij}^{(\phi)} = 0$ в противоположном случае; Γ_{i1}, Γ_{i2} — множество номеров бизнес-процессов, непосредственно предшествующих A_i и логически связанных с A_i с помощью операции «И» и «ИЛИ» соответственно; $\Gamma_{i\delta 1}, \Gamma_{i\delta 2}$ — множество номеров операций $D_{\nu}^{(i)}$ и $D_{\mu}^{(i)}$, непосредственно предшествующих операции $D_{\delta}^{(i)}$ и логически связанных с ней с помощью операций «И» и «ИЛИ» соответственно.

Таким образом, с помощью ограничений вида (2.2) и (2.3) задаются возможные последовательности реализации функций управления и технологических операций. Согласно ограничениям вида (2.4) и (2.5) в каждый текущий момент времени бизнес-процесс A_i может реализовываться только в одной подсистеме B_j ($i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, m$) и, наоборот, в каждой подсистеме B_j может в каждый момент времени реализовываться только один бизнес-процесс A_i . По аналогии с данными ограничениями должны выполняться похожие по своему содержанию ограничения применительно к технологическим операциям $D_{\delta}^{(i)}$ при их выполнении на техническом

комплексе $C_{\lambda}^{(j)}$.

С помощью соотношения (2.6) задаются условия, при которых происходит срабатывание вспомогательного управляющего воздействия $v_{ij}^{(\phi)}(t)$; соотношения (2.7) и (2.8) задают ограничения на значения фазовых переменных в моменты времени $t = t_0, t = t_f$ (краевые условия), \mathbf{R}^1 — множество положительных вещественных чисел; J_0, J_1, J_2 — показатели качества распределения бизнес-процессов в ИИС ВП, при этом J_0 характеризует общее число реализованных функций управления в ИИС ВП в момент времени $t = t_f$; J_1 показатель, характеризующий общее количество функций

управления A_i , которое было реализовано в B_j подсистеме ИИС ВП, J_2 — показатель, характеризующий длительность интервала времени, за который в ИИС ВП были реализованы все требуемые функции управления. Для учёта факторов неопределённости в построенной модели целесообразно соотношения (2.1)–(2.9) дополнить имитационной моделью процесса реализации плана распределения функций управления. В этом случае в рамках созданного аналитико-имитационного комплекса, и, основываясь на концепциях, методах и алгоритмах системного моделирования, можно построить соответствующие процедуры межмодельного согласования [4, 5]. В целом расчёт экстремальных значений показателей качества функционирования ИИС ВП на основе предложенной модели (2.1)–(2.9) сводится к решению задачи оптимального управления конечномерной дифференциальной динамической системой со смешанными ограничениями. В работах [4, 5] подробно изложены конкретные алгоритмы решения такого рода задач, особенности их программной реализации.

На **шаге 2** обобщённого алгоритма решения рассматриваемой в статье задачи осуществляется расчёт структурно-топологических показателей ИИС ВП, к которым были отнесены [9]: показатель (коэффициент) достижимости J_4 ; показатели компактности структуры (радиус структуры J_5 , диаметр структуры J_6 , интегральный показатель структурной компактности J_7); показатели централизованности (децентрализованности) структуры J_8 . Расчёт данных показателей проводится по аналитическим формулам, приведённым в работе [9].

Шаг 3. На основе экспертного опроса формируется матрица попарного сравнения перечисленных ранее показателей качества функционирования ИИС ВП — K_{cp} .

Шаг 4. В соответствии с алгоритмом, предложенным в работе [10], по матрице K_{cp} проводится восстановление относительных весов (коэффициентов важности) показателей, оценивающих варианты распределения функций управления для каждого заданного структурного состояния ИИС ВП. С этой целью осуществляется поиск нормированного к единице собственного вектора этой матрицы $\overset{1}{\omega}_{cp}$, соответствующего максимальному собственному числу ρ_{max} . Для этого должно быть решено уравнение следующего вида:

$$(K_{cp} - \rho_{max} I) \overset{1}{\omega}_{cp} = 0, \quad (2.10)$$

где I — единичная матрица.

Далее проводится поиск относительного веса каждого варианта структурного состояния (R_1, R_2, \dots, R_χ) ИИС ВП по каждому показателю в отдельности (формирование матрицы $K_{отн}$). В каждом столбце матрицы $K_{отн}$

указаны относительные веса, приписываемые соответствующему структурному состоянию по соответствующему показателю. После этого строится взвешенная сумма заданных показателей с заданными коэффициентами для каждой альтернативы R_1, \dots, R_x . Другими словами, производится поиск результирующих наборов весов каждого из структурных состояний. Для этого необходимо умножить матрицу $K_{\text{отн}}$ на вектор $\overset{\Gamma}{\omega}_{cp}$:

$$K_{\text{отн}} \overset{\Gamma}{\omega}_{cp} = \overset{\Gamma}{\omega}^*. \quad (2.11)$$

Шаг 5. Производится упорядочение структурных состояний, наилучшим считается то структурное состояние, которому соответствует максимальный элемент вектора $\overset{\Gamma}{\omega}^*$. Каждый из указанных элементов вектора $\overset{\Gamma}{\omega}^*$ можно интерпретировать как результирующий вес каждого структурного состояния.

Заключение

Рассмотренная в статье динамическая интерпретация процессов комплексного планирования работ в ИИС ВП позволяет строго математически описать и всесторонне исследовать взаимное влияние бизнес-процессов и процессов обработки, хранения, передачи (приема) информации в указанной территориально-распределенной системе.

Предлагаемое решение задачи комплексного многокритериального планирования работ в ИИС в общем контексте управления её структурной динамикой позволяет: непосредственно связать цели, на достижение которых ориентированы текущие бизнес-процессы, с целями, которые реализуются в ходе управления структурами ИИС, обоснованно определить и выбрать соответствующие последовательности решаемых задач и выполняемых операций (действий), связанных со структурной динамикой (другими словами, синтезировать технологию управления ИИС), осознанно находить компромиссные решения при распределении функций управления бизнес-процессами между основными элементами и подсистемами ИИС ВП и формировании программ (планов) управления ими. При этом предварительное упорядочение перечисленных структурных состояний ИИС ВП позволяет при деградации указанной системы оперативно находить программы управления ее структурной динамикой [4]. К настоящему времени разработано несколько версий прототипа программного обеспечения решения задач управления структурной динамикой ИИС в различных предметных областях (космонавтика, электроэнергетика, менеджмент, см. <http://www.spiiiras-grom.ru>), которые подтвердили работоспособность и эффективность предложенного модельно-алгоритмического обеспечения.

Литература

1. Virtual Enterprises and Collaborative Networks, edited by L. Camarilha-Matos, Kluwer Academic Publishers, 2004. P. 610.
2. Wang L., Norrie D. H. Process Planning and Control in a Holonic Manufacturing Environment. *Journal of Applied Systems Studies*, 2001. 2 (1): P. 106–126.
3. Иванов Д. А. Виртуальные предприятия и логистические цепи: комплексный подход к организации и оперативному управлению в новых формах производственной кооперации. СПб.: Изд-во СПбГУЭФ, 2003. С. 120.
4. Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических систем. М.: Наука, 2006. 410 с.
5. Калинин В. Н., Соколов Б. В. Многомодельный подход к описанию процессов управления космическими средствами // Теория и системы управления. 1995. № 1. С. 149–156.
6. Цвиркун А. Д., Акинфиев В. К. Структура многоуровневых и крупномасштабных систем (синтез и планирование развития). М.: Наука, 1993. С. 160.
7. Цвиркун А. Д., Акинфиев В. К., Филиппов В. А. Имитационное моделирование в задачах синтеза структуры сложных систем: Оптимизационно-имитационный подход. М.: Наука, 1985. С. 172.
8. Зимин И. Н., Иванюков Ю. П. Решение задач сетевого планирования сведением их к задачам оптимального управления // Журнал вычислительной математики и математической физики. 1971. Т. 11. № 3. С. 632–641.
9. Ore O. Теория графов. М.: Наука, 1968. С. 352. 2-е изд. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ»/URSS, 2009.
10. Орловский С. А. Проблемы принятия решений при нечёткой исходной информации. М.: Наука, 1981. С. 208.