

ПРОГРАММНО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОЦЕССА МОДЕРНИЗАЦИИ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

В. В. ЗАХАРОВ

*Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр Российской академии наук,
199178, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: Valeriov@yandex.ru*

Представлен подход к разработке программно-математического обеспечения, который позволяет решить задачу синтеза интегрированного плана модернизации информационной системы и функционирования сложного объекта. Представлены модель производственных процессов и модель управления модернизацией информационных сервисов. Описан программный прототип, синтезирующий соответствующий оптимальный комплексный план на основе метода локальных сечений Болтянского. Разработанный программный комплекс позволяет рационально подходить к выбору первоначального диспетчерского плана и находить компромиссные решения при наличии множества возможных вариантов проведения модернизации интегрированных информационных систем. Приведены результаты экспериментов.

Ключевые слова: планирование модернизации, комплексная модернизация, оптимизация процесса модернизации, комплексное планирование модернизации

Введение. Современный темп перехода к рациональному и согласованному распределению информационных потоков в промышленном Интернете требует разработки соответствующего программно-математического обеспечения, что позволит динамически решать задачи адаптации и развития сложных объектов (СЛО) [1]. Очевидно, что создать информационно-управляющую систему, которая удовлетворит будущие запросы пользователей, невозможно. Поэтому современные информационные системы (ИС) должны быть гибкими и реконфигурируемыми, т.е. иметь возможность адаптироваться к внутренним и внешним условиям и изменениям [1—4]. Таким образом, в существующие и перспективные СЛО следует заложить структурно-функциональную избыточность на различных уровнях иерархий, которая позволит в дальнейшем реализовать механизмы постоянного синтеза программ обслуживания и модернизации [5].

Особенности задач управления функционированием и модернизацией сложных объектов. Современные ИС, интегрированные в объекты критических и производственных инфраструктур, решают задачи управления [6]. Минимальные задержки в выработке управляющих воздействий или отказы части подсистем ИС могут стать причинами аварийных ситуаций [7]. К одной из главных особенностей данной предметной области относится высокая интенсивность выполнения основных, обеспечивающих и вспомогательных операций. Время выработки управляющих программ или рекомендаций для лиц, принимающих решения, является одной из ключевых характеристик информационных систем, так как даже медленные процессы часто включают в себя операции, продолжительность которых всего 4—6 ч [8].

Проблемы планирования процессов функционирования и модернизации СЛО относятся к классу задач управления жизненным циклом (ЖЦ) изделий и больших систем. Отметим, что сегодня разделение ЖЦ на стадии весьма условно. В рамках короткого интервала времени рассматриваемые элементы или целые подсистемы могут быть спроектированы, введены в эксплуатацию и выведены из нее. Какое-либо разделение ЖЦ на этапы невозможно

при решении задач интегрированного планирования процессов функционирования, поддержки и модернизации унаследованных ИС [9].

Принцип непрекращающейся адаптации (обновления) предполагает постоянную настройку и развитие ИС, прототипирование и переналадку исполнительных устройств. Перечисленные мероприятия связаны с проведением комплекса организационно-технологических работ, которые требуют моделирования и оптимизации [9]. Отметим, что на практике внедряемые коммерческие информационно-управляющие системы становятся индивидуальными и трудно поддерживаемыми из-за множества изменяемых под частные задачи модулей, а интеграция новых решений происходит до завершения полного внедрения предыдущих [10].

В подобных условиях интегрированное планирование и оптимизация процессов функционирования СЛО возможны только с учетом динамики, которая свойственна структурам рассматриваемого объекта [5]. Разрабатываемое модельно-алгоритмическое и программно-математическое обеспечение позволит синтезировать комплексные программы взаимодействия в едином масштабе времени на всех уровнях большеразмерной системы.

Требования к программно-математическому обеспечению. Интегрированный план функционирования СЛО и модернизации ИС должен учитывать особенности структурно-функционального облика объекта управления [8]. Для того чтобы находить рациональные решения целевых задач необходимо использовать единый язык описания гетерогенных процессов взаимодействия элементов и подсистем, в противном случае отсутствие согласованности формируемых управляющих воздействий (планов) приведет к дополнительным затратам на обслуживание и поддержку функционирования объекта [5].

Подчеркнем, что многошаговые алгоритмы современных ИС, включающие этапы взаимодействия с пользователем, сегодня оказываются непригодны в критических ситуациях, требующих принятия оперативных решений. В подобных условиях разработчики прибегают к эвристическим методам, которые позволяют повысить скорость сходимости решения и синтезировать программы управления в автоматическом режиме. Отметим, что на этом пути необходимо обоснованно выбирать модели, методы и алгоритмы, которые будут использованы в качестве ядра программно-математического обеспечения, в противном случае получаемые комплексные программы, в том числе функционирования СЛО и модернизации ИС, будут далеки от оптимальных [11].

Предлагаемый подход. Применительно к модернизации ИС СЛО раскрытие всех зависимостей нецелесообразно, поскольку это приведет к чрезмерному усложнению модели [12]. Для описания процессов функционирования СЛО и модернизации ИС используются логико-динамические модели, основанные на принципах сервис-ориентированного подхода [13]. На модельно-алгоритмическом уровне разработан полимодельный комплекс, состоящий из модели выполнения производственных операций и модели модернизации информационных сервисов. Подробнее с динамической интерпретацией формального описания и совместного решения задачи модернизации ИС и функционирования СЛО можно ознакомиться в работах [14, 15].

Предлагаемый программный комплекс позволяет описывать полииерархические связи и опираться на положения программно-целевого подхода в процессе разработки рационального интегрированного плана функционирования СЛО и модернизации ИС. Оригинальной особенностью является возможность следовать принципам иерархического описания процессов взаимодействия различных подсистем, структур и элементов: к примеру, на верхние уровни передается только необходимая информация о готовности соответствующего информационного сервиса предоставить исполняющему устройству требуемую услугу.

Формальная постановка задачи. Для достижения цели функционирования СЛО — выполнение плановых задач — необходимо рационально распределить физические и информационные ресурсы, а также соответствующие потоки в каждый момент времени, при этом

показатель качества управления должен стремиться к экстремуму. Предлагаемый подход позволяет свести задачу теории расписаний к задаче поиска оптимального программного управления, основанного на методе локальных сечений Болтянского, и решению специализированной краевой двухточечной задачи. Представленная интерпретация обязывает исследователя выполнить поиск вектора управляющих воздействий, максимизирующего обобщенный показатель качества и удовлетворяющего всем видам ограничений (организационных, технологических, технических и т.д.) [5, 16, 17].

Для формальной постановки задачи совместного планирования программ производства и процессов модернизации информационных сервисов введем необходимые множества. Пусть $A = \{A_v^o, v \in N, N = \{1, 2, \dots, n\}\}$ — множество цехов производственного предприятия. Допустим, что в цехе установлены унифицированные средства производства. Введем обобщенное множество связанных производственных единиц (многофункциональных станков или ресурсов) $B = \{B_j^{(o,v)}, j \in D^{(o,v)}, D^{(o,v)} = \{1, 2, \dots, m_v\}, v \in N\}$. Предприятие формирует заказы и размещает их в подразделении. Заказ состоит из набора операций (бизнес-процессов), которые необходимо выполнить. Представим логико-динамическую модель производственного процесса, которая связана с моделью модернизации (представленной далее) с помощью технологических ограничений:

$$\begin{aligned}
 M_o = & \left\{ \mathbf{u}^{(o)}(t) \mid \dot{x}_{lij}^{(o,v)} = \sum_{j=1}^{m_v} r_{lij}^{(o,v)}(t) u_{lij}^{(o,v)}; \right. \\
 & x_{lij}^{(o,v)}(t_0) = 0; \quad x_{lij}^{(o,v)}(t_f) = a_{lij}^{(o,v)}; \\
 & \sum_{i=1}^{s_j} u_{lij}^{(o,v)} \leq P_j^{(o,v)} \quad \forall l, \forall j; \quad \sum_{j=1}^{m_v} u_{lij}^{(o,v)} \leq P_i^{(o,v)} \quad \forall l, \forall i; \\
 & u_{lij}^{(o,v)}(t) \in \{0, 1\}; \\
 & \left. u_{lij}^{(o,v)} \left[\sum_{\tilde{\alpha} \in \Gamma_{lij1}} (a_{l\tilde{\alpha}j}^{(o,v)} - x_{l\tilde{\alpha}j}^{(o,v)}) + \prod_{\tilde{\beta} \in \Gamma_{lij2}} (a_{l\tilde{\beta}j}^{(o,v)} - x_{l\tilde{\beta}j}^{(o,v)}) + \sum_{\tilde{i}=1}^{z_d} (a_{ij}^{(m,v)} - x_{ij}^{(m,v)}) \right] = 0; \right. \\
 & \left. i = 1, \dots, s_j; j = 1, \dots, m_v \right\}, \tag{1}
 \end{aligned}$$

где $x_{lij}^{(o,v)}$ — переменная, характеризующая текущее состояние i -й операции $D_{li}^{(o,v)}$, которая входит в l -й заказ $O_l^{(o,v)}$, размещенный в цехе A_v предприятия; $r_{ij}^{(o,v)}(t)$ — известная матричная временная функция, с помощью которой задаются пространственно-временные ограничения, связанные с производственным процессом, эта функция принимает значение „1“, если операцию возможно выполнить, и „0“ — в противоположном случае; $u_{lij}^{(o,v)}$ — управляющее воздействие, принимающее значение „1“, если i -я операция $D_{li}^{(o,v)}$ l -го заказа выполняется на j -м унифицированном станке $B_j^{(o,v)}$, и „0“ — в противоположном случае; $x_{lij}^{(o,v)}(t_0)$ и $x_{lij}^{(o,v)}(t_f)$ — краевые условия в начальный и конечный моменты времени соответственно; $a_{ij}^{(o,v)}$ — общий объем заказа в условных единицах; $P_j^{(o,v)}, P_i^{(o,v)}$ — константы, которые определяют возможность одновременного выполнения i -й операции l -го заказа на j -м унифици-

рованном станке $B_j^{(o,v)}$, а также описывают возможность использования нескольких ресурсов производства, что характеризует общие технические и технологические ограничения для цехов и унифицированных станков, в рассматриваемом случае $P_i^{(o,v)} = 1$; $a_{i\alpha_j}^{(o,v)}$, $a_{i\beta_j}^{(o,v)}$ и $x_{i\alpha_j}^{(o,v)}$, $x_{i\beta_j}^{(o,v)}$ — соответственно заданный и текущий объем операций или условных единиц продукции в заказе, размещенном в цехе; $\Gamma_{lij1}, \Gamma_{lij2}$ — множества номеров производственных операций, непосредственно предшествующих текущей производственной операции и технологически связанных с ней с помощью логических операций „И“, „ИЛИ“ соответственно, — таким образом задается технология производства; $a_{ij}^{(m,v)}$ — заданный объем текущих операций модернизации информационных сервисов; $x_{ij}^{(m,v)}$ — переменная, характеризующая текущее состояние операции по модернизации управляющих стоек, которые предоставляют информационные сервисы подсистемам СЛО.

Для описания логико-динамической модели управления модернизацией информационных сервисов введем множество информационных сервисов $\tilde{B} = \{\tilde{B}_{\tilde{j}}^m, \tilde{j} \in \tilde{D}^{(m,v)} \in D^{(o,v)}\}$, связанных с соответствующими производственными ресурсами (станками), и множество операций $M = \{M_{\tilde{i}}^{(m,v)}, \tilde{i} \in E^{(m,v)}, E^{(m,v)} = \{1, 2, \dots, z_d\}, d \in \tilde{D}^{(m,v)}\}$ по модернизации информационных сервисов. На физическом уровне подобные работы могут быть связаны с модернизацией вычислительных ресурсов, установкой дополнительных встраиваемых измерительных устройств и т.д., на информационном уровне — с обновлением программного обеспечения управляющих стоек или настройкой ИС для подключения удаленного рабочего места и т.д. С учетом принятых обозначений модель модернизации имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
 M_u = & \left\{ \mathbf{u}^{(m,v)}(t) \mid \dot{x}_{\tilde{i}\tilde{j}}^{(m,v)} = \sum_{\tilde{j}=1}^{m_v} m_{\tilde{i}\tilde{j}}(t) u_{\tilde{i}\tilde{j}}^{(m,v)}; \right. \\
 & x_{\tilde{i}\tilde{j}}^{(m,v)}(t_0) = 0; \quad x_{\tilde{i}\tilde{j}}^{(m,v)}(t_f) = a_{\tilde{i}\tilde{j}}^{(m,v)}; \\
 & \sum_{\tilde{i}=1}^{z_d} \sum_{\tilde{j}=1}^{m_v} u_{\tilde{i}\tilde{j}}^{(m,v)} \leq R_{\tilde{j}}^{(m,v)}; \quad \sum_{\tilde{j}=1}^{m_v} \sum_{\tilde{i}=1}^{z_d} u_{\tilde{i}\tilde{j}}^{(m,v)} \leq R_{\tilde{i}}^{(m,v)}; \\
 & u_{\tilde{i}\tilde{j}}^{(m,v)}(t) \in \{0, 1\}; \\
 & \left. u_{\tilde{i}\tilde{j}}^{(m,v)} \left[\sum_{\tilde{k} \in \Gamma_{\tilde{i}\tilde{j}3}} \left(a_{\tilde{k}\tilde{j}}^{(m,v)} - x_{\tilde{k}\tilde{j}}^{(m,v)} \right) + \sum_{j=1}^{m_v} \left(a_{lij}^{(o,v)} - x_{lij}^{(o,v)} \right) \right] = 0, \right. \\
 & \left. \tilde{i} = 1, \dots, z_d; \tilde{j} = 1, \dots, m_v \right\}, \quad (2)
 \end{aligned}$$

где $x_{\tilde{i}\tilde{j}}^{(m,v)}$ — переменная, характеризующая состояние \tilde{i} -й операции модернизации \tilde{j} -го информационного сервиса $\tilde{B}_{\tilde{j}}^m$ в цехе A_v ; $m_{\tilde{i}\tilde{j}}(t)$ — известная матричная временная функция, с помощью которой задаются пространственно-временные ограничения, связанные с процессом модернизации ИС, функция принимает значение „1“, если в данном интервале времени работы по модернизации могут быть произведены, и „0“ — в противоположном случае; $u_{\tilde{i}\tilde{j}}^{(m,v)}$ — интенсивность выполнения операций модернизации информационных сервисов

$M_i^{(m,v)}$, $u_{ij}^{(m,v)} = [0, 1]$; $a_{ij}^{(m,v)}$ — заданный объем выполнения операций модернизации $M_i^{(m,v)}$; $R_j^{(m,v)}$, $R_i^{(m,v)}$ — заданные константы, характеризующие технические ограничения, связанные с проведением модернизации; $\Gamma_{\tilde{ij}3}$ — множество номеров операций модернизации информационных сервисов, непосредственно предшествующих операции $M_i^{(m,v)}$ и технологически связанных с ней с помощью логической операции „И“; остальные обозначения аналогичны принятым в формуле (1).

Введем показатели качества. Качество планирования процессов функционирования СЛО и модернизации ИС оценивается с помощью следующих критериальных функций:

$$J_1^{(o,v)} = \frac{1}{2} \sum_{l=1}^{O_l} \sum_{i=1}^{s_i} \sum_{j=1}^{m_v} [a_{lij}^{(o,v)} - x_{lij}^{(o,v)}(t_f)]^2;$$

$$J_2^{(o,v)} = \sum_{l=1}^{O_l} \sum_{i=1}^{s_i} \sum_{j=1}^{m_v} \int_{t_0}^{t_f} \eta_{lij}(\tau) u_{lij}^{(o,v)}(\tau) d\tau;$$

$$J_3^{(m,v)} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{z_d} \sum_{j=1}^{m_v} [T^{(m,v)} - x_{ij}^{(m,v)}(t_f)]^2,$$

где функция J_1 оценивает полноту выполнения требуемого объема производственных операций, входящих в технологический цикл производства; J_2 оценивает величину суммарного штрафа за нарушение заданных директивных сроков выполнения производственных операций; $\eta_{lij}(\tau)$ — известные монотонные функции времени, которые выбираются с учетом заданных директивных сроков начала (конца) выполнения производственных операций; показатель J_3 оценивает равномерность проведения модернизации ИС; T — обобщенное время, выделенное для проведения модернизации.

Уникальность разработанного полимодельного комплекса состоит в том, что с единых позиций на модельно-алгоритмическом уровне удалось описать процессы модернизации информационных сервисов и производственных процессов предприятия. Страты, функционирующие в разных временных рамках, связаны с помощью логических ограничений, именно они позволяют гибко и динамически определять технологию проведения работ. К примеру, этап модернизации информационных сервисов не может быть начат до окончания текущих производственных операций. Обработка (выпуск) изделий невозможна до завершения модернизационных работ. Подробно с алгоритмом синтеза оптимальной программы модернизации ИС и функционирования СЛО можно ознакомиться в работах [17, 18].

Программный комплекс. Программный комплекс для решения задач планирования процессов функционирования СЛО и модернизации ИС разработан с использованием языка программирования С++ и имеет показанную на рис. 1 объектно-ориентированную спецификацию. В состав программного комплекса входят: модуль реализации вычислительных алгоритмов, выполненный с помощью библиотеки MatLab 2020 для решения задач линейного и целочисленного программирования, которые возникают на этапе расчета значений гамильтониана [18]; модуль пользовательского интерфейса визуализации результатов; модуль пользовательского интерфейса редактора моделей; модуль экспертного опроса, благодаря которому возможно ввести значимость выбранных показателей для лиц, принимающих решения; модуль взаимодействия с базой данных и другие модули [18]. На рис. 2, а, б представлены

скриншоты, отображающие интерфейсы ввода данных и вывода предварительных результатов (комплексной программы модернизации).

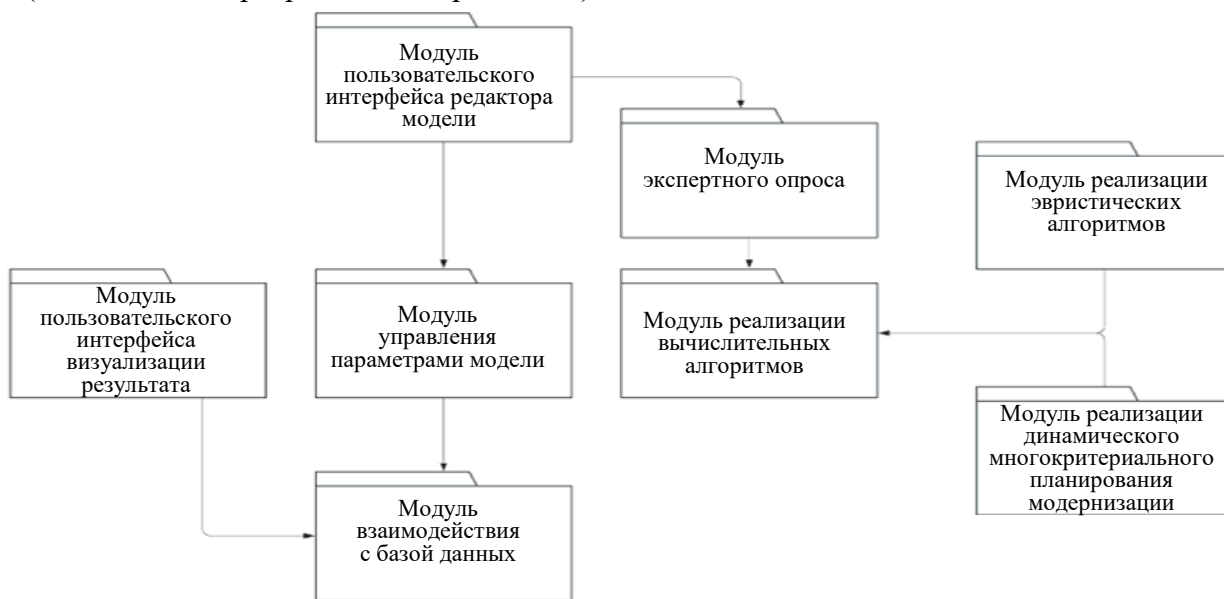


Рис. 1

a)

Parameters

Management of modernization

Amount of informational resources: 16

Amount of operations for modernization (max.): 7

Amount of the resources for modernization: 5

Time interval: 9

Lambda_2: 0, 0.2, 0.6, 0.2

Lambda_3: 0.3, 0.1, 0.6

Convergence criterion: 1

Management of information system

Amount of informational streams: 17

Amount of operations in the streams (max.): 3

Create model

b)

The generated schedules

Management of information system

Resurs №1	T1	T2	T3	T4	T5	Resurs №2	T1	T2	T3	T4
Stream 1 Oper 1	867	0	0	0	0	Oper 1.1	867	0	0	0
Oper 2.0	646	0	0	0	0	Oper 1.2	0	646	0	0
Oper 3.0	0	0	402	0	0	Oper 1.3	0	0	402	0
Stream 2 Oper 1	389	0	0	0	0	Oper 2.1	389	0	0	0
Oper 2.0	530	0	0	0	0	Oper 2.2	0	530	0	0
Oper 3.0	0	0	0	0	0	Oper 2.3	0	0	0	0
Stream 3 Oper 1	1105	0	0	0	0	Oper 3.1	1105	0	0	0
Oper 2.0	512	351	0	0	0	Oper 3.2	0	512	351	0
Oper 3.0	0	0	701	0	0	Oper 3.3	0	0	0	701
Stream 4 Oper 1	631	0	0	0	0	Oper 4.1	631	0	0	0
Oper 2.0	758	0	0	0	0	Oper 4.2	0	758	0	0
Oper 3.0	0	411	0	0	0	Oper 4.3	0	0	411	0
Stream 5 Oper 1	0	0	0	0	0	Oper 5.1	0	0	0	0
Oper 2.0	757	0	0	0	0	Oper 5.2	0	757	0	0
Oper 3.0	0	236	0	0	0	Oper 5.3	0	0	236	0
Stream 6 Oper 1	374	0	0	0	0	Oper 6.1	374	0	0	0
Oper 2.0	207	0	0	0	0	Oper 6.2	0	207	0	0
Oper 3.0	0	254	0	0	0	Oper 6.3	0	0	254	0
Stream 7 Oper 1	810	0	0	0	0	Oper 7.1	810	0	0	0
Oper 2.0	974	0	0	0	0	Oper 7.2	0	974	0	0
Oper 3.0	0	339	0	0	0	Oper 7.3	0	0	339	0

Management of modernization

Resurs №1	Day 1	Day 2	Day 3	Day 4	Day 5
Obj 1 Oper 1	1	0	0	0	0
Oper 2.0	0	0	0	0	0
Oper 3.0	0	0	0	0	0
Obj 2 Oper 1	0	0	0	0	0
Oper 2.0	0	1	1	0	0
Oper 3.0	0	0	0	0	0
Obj 3 Oper 1	0	0	0	0	0
Oper 2.0	0	0	0	0	0
Oper 3.0	0	0	0	0	1
Obj 4 Oper 1	0	0	0	0	0
Oper 2.0	0	0	0	0	0
Oper 3.0	0	0	0	0	0
Obj 5 Oper 1	0	0	0	0	0
Oper 2.0	0	0	0	0	0
Oper 3.0	0	0	1	0	0
Obj 6 Oper 1	1	0	0	0	0
Oper 2.0	0	0	0	0	0
Oper 3.0	0	0	0	0	0
Resurs №2					
Obj 1 Oper 1	0	0	0	0	0
Oper 2.0	1	1	1	1	0

level_2: 2.402034267e+ Quality coefficient: the dispatching decision

level_3: 539.1 Quality coefficient: the received decision

Рис. 2

Были проведены исследования по оценке влияния количества доступных ресурсов для модернизации информационных сервисов на эффективность функционирования СЛО (производственного предприятия) в зависимости от распределения значимости показателя качества (J_1, J_2, J_3). Были рассмотрены три варианта: избыток ресурсов — эксперимент 1, ограниченные ресурсы — эксперимент 2, чрезвычайный случай, т.е. нехватка ресурсов — эксперимент 3 (табл. 1—3 соответственно). В таблицах использованы следующие обозначения: Obj — количество информационных сервисов, которые необходимо обновить; Oper — количество операций модернизации информационных сервисов (для наглядности эксперимента предположим, что количество этих операций одинаково); Resource — количество ресурсов для проведения модернизации; Time — период времени для модернизации (количество дней); Q_{res} — обобщенный показатель качества решения.

Таблица 1

Избыток ресурсов	Показатель качества	Вариант распределения значимости показателя			
		1	2	3	4
Obj=15	J_1	0,8	0,1	0,1	0,33
Oper=3	J_2	0,1	0,8	0,1	0,33
Resource=15	J_3	0,1	0,1	0,8	0,33
Time=10	Q_{res}	0,33	0,1	0,57	0,17

Таблица 2

Ограниченные ресурсы	Показатель качества	Вариант распределения значимости показателя			
		1	2	3	4
Obj=20	J_1	0,8	0,1	0,1	0,33
Oper=3	J_2	0,1	0,8	0,1	0,33
Resource=10	J_3	0,1	0,1	0,8	0,33
Time=9	Q_{res}	0,46	0,36	0,16	0,34

Таблица 3

Нехватка ресурсов	Показатель качества	Вариант распределения значимости показателя			
		1	2	3	4
Obj=15	J_1	0,8	0,1	0,1	0,33
Oper=3	J_2	0,1	0,8	0,1	0,33
Resource=3	J_3	0,1	0,1	0,8	0,33
Time=9	Q_{res}	0,31	0,51	0,46	0,54

Вычисленные значения показателей качества планирования процесса модернизации были приведены к безразмерному виду.

Проведенные эксперименты выявили следующие закономерности. При избытке ресурсов эффективность планов, в зависимости от расставленных приоритетов, существенно не различается. При умеренном объеме ресурсов наиболее эффективной является оценка приоритетов, учитывающая полноту выполнения производственных операций (J_1). В случае сбоев или чрезвычайной ситуации качество плана модернизации не зависит от выбранных показателей.

Если значимость показателей распределять равномерно, то синтезированный план модернизации СЛО оказывается далек от оптимального. Ориентация только на величину суммарного штрафа за невыполнение операций (J_2) привела к снижению качества конечного плана модернизации. Важно отметить, что наиболее эффективные планы для всех вариантов были синтезированы при различных комбинациях значимости показателей качества. Это указывает на наличие неявных зависимостей, возникающих при различных условиях эксплуатации.

Отметим, что алгоритм, предложенный в работах [16, 18], требует большего процессорного времени, чем эвристические алгоритмы, следовательно, его непосредственное применение возможно только в системах, не предъявляющих жестких требований к времени отклика.

Как показали эксперименты, использование более четырех-пяти показателей качества существенно усложняет интерпретацию результатов. Необоснованная избыточность требований к разрабатываемым планам приводит к неустойчивости получаемых решений.

Заключение. В рамках предложенного программного комплекса реализованы идеи, описанные в ранее опубликованных работах. Рассмотренный подход позволяет количественно оценить условия, связанные с комплексным решением целевых задач функционирования и модернизации СЛО. Представленное программно-математическое обеспечение дает уникальную возможность синтезировать рациональный интегрированный план, исключая частный характер решений. Разработанный программный комплекс, в отличие от существующих программных решений, позволяет синтезировать интегрированный оптимальный план модернизации, который нацелен на решение стратегических задач в едином масштабе времени.

Рассмотренный путь формализации структур СЛО обеспечивает возможность реализовать на практике межмодельное взаимодействие различных по своему функциональному и техническому назначению подсистем и произвести оптимизацию процессов функционирования и модернизации производственных объектов и информационных систем, что не удавалось выполнить ранее. Дополнительно выявлен ряд закономерностей, открывающий очевидные перспективы для дальнейших исследований по оценке влияния мнений экспертов на качество разрабатываемых планов.

Исследования, выполненные по данной тематике, проводились при частичной финансовой поддержке РФФИ (гранты № 19-08-00989, 20-08-01046) в рамках бюджетной темы № 0073–2019–0004.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Потрясаев С. А. Математическое и программное обеспечение синтеза технологий и планов работы киберфизических систем // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 11. С. 939–946.
2. Capawa Fotsoh E., Mebarki N., Castagna P., Berruet P. A Classification for Reconfigurable Manufacturing Systems // Reconfigurable Manufacturing Systems: From Design to Implementation / L. Benyousef (Ed.). Springer, Cham. 2020. P. 11–28 [Электронный ресурс]: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-28782-5_2>.
3. Koren Y., Gu X., Guo W. Reconfigurable manufacturing systems: Principles, design, and future trends // Frontiers of Mechanical Engineering. 2018. N 13(2). P. 121–136. DOI: 10.1007/s11465-018-0483-0.
4. Морозов В. П., Дымарский Я. С. Элементы теории управления ГАП. Математическое обеспечение. Л.: Машиностроение, 1984. 333 с.
5. Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006. 410 с.
6. Ivanov D., Sokolov B. V. Dynamic co-ordinated scheduling in the supply chain under a process modernisation // Intern. Journal of Production Research. 2013. N 51(9). P. 2680–2697. DOI: 10.1080/00207543.2012.737950.
7. Sokolov B. V., Pavlov A. N., Potryasaev S. A., Zakharov V. V. Methodology and technologies of the complex objects proactive intellectual situational management and control in emergencies // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 1156. P. 234–243. DOI: 10.1007/978-3-030-50097-9_24.
8. Ли Т. Г., Адамс Г. Э., Гейнс У. М. Управление процессами с помощью ЭВМ. Моделирование и оптимизация. М.: Сов. радио, 2002. 312 с.
9. Массель Л. В., Подкаменный Д. В. Системный анализ и реинжиниринг унаследованного программного обеспечения // Машиностроение и компьютерные технологии. 2011. № 4 [Электронный ресурс]: <<http://technomag.edu.ru/doc/174911.html>>.
10. Юсупов Р. М., Мусаев А. А. Проблема оценивания эффективности информационных технологий // Материалы конф. „Информационные технологии в управлении“ (ИТУ-2018). СПб: ЦНИИ „Электроприбор“, 2018. С. 74–85.

11. Микони С. В., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов: Монография. М.: Наука, 2018. 410 с.
12. Рахимов Т. Н., Заикин О. А., Советов Б. Я. Основы построения АСУ. Ташкент: Укитувчи, 1984. 374 с.
13. Шилов Н. Г. Методология построения проактивных рекомендующих систем для инфомобильных приложений // Информационно-управляющие системы. 2016. № 6 (85). С. 16—24.
14. Захаров В. В. Динамическая интерпретация формального описания и решения задачи модернизации сложных объектов // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 10. С. 914—920.
15. Захаров В. В., Ушаков В. А. Динамический подход к планированию модернизации автоматизированных систем управления производственными объектами // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 6. С. 585—588.
16. Sokolov B. V., Gnidenko A. S., Shalyto A. A. Models and algorithms of operational planning and control of dynamical objects with application of the Pontryagin's Maximum principle // Proc. of the IEEE 5th Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering, AIEEE, Latvia, Riga, 24—25 Nov., 2017. P. 1—5.
17. <https://litsam.ru>
18. Соколов Б. В., Захаров В. В., Назаров Д. И. Совместное оперативное планирование измерительных и вычислительных операций в киберфизических системах // Научное приборостроение. 2020. Т. 3, № 3. С. 49—62.

Сведения об авторе

Валерий Вячеславович Захаров

— СПбФИЦ РАН, СПИИРАН, лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании; мл. научный сотрудник;
E-mail: valeriov@yandex.ru

Поступила в редакцию
02.10.2020 г.

Ссылка для цитирования: Захаров В. В. Программно-математическое обеспечение процесса модернизации сложных объектов // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 11. С. 975—984.

SOFTWARE AND MATHEMATICAL SUPPORT FOR COMPLEX OBJECTS MODERNIZATION

V. V. Zakharov

St. Petersburg Federal Research Center of the RAS,
199178, St. Petersburg, Russia
E-mail: Valeriov@yandex.ru

An approach to development of software and mathematics that allows to solve the problem of synthesizing an integrated plan for modernization of an information system and for a complex object functioning is developed. A model of production processes and a management model of information services modernization are presented. A software prototype is described that synthesizes the optimal integrated plan based on the Boltzansky local section method. The developed software package makes it possible to rationally approach the choice of the initial dispatch plan and find compromise solutions in the presence of many possible options for modernizing integrated information systems. Results of experiments are presented.

Keywords: modernization planning, complex modernization, optimization of modernization process, complex planning of modernization

REFERENCES

1. Potryasaev S. A. *Journal of Instrument Engineering*, 2018, no. 11(61), pp. 939–946. (in Russ.)
2. Сапова F.E., Mebarki N., Castagna P., Berruet P. *Reconfigurable Manufacturing Systems: from Design to Implementation. Springer Series in Advanced Manufacturing*, Springer, Cham, 2020, pp. 11–28, https://doi.org/10.1007/978-3-030-28782-5_2.
3. Koren Y., Gu X., Guo W. *Front. Mech. Eng.*, 2018, no. 2(13), pp. 121–136, DOI:10.1007/s11465-018-0483-0.
4. Morozov V.P., Dymarskiy Ya.S. *Elementy teorii upravleniya gibkim avtomatizirovannym proizvodstvom. Matematicheskoye obespecheniye* (Elements of the Theory of Management of Flexible Automated Production. Mathematical Software), Leningrad, 1984, 333 p. (in Russ.)

5. Okhtilev M.Yu., Sokolov B.V., Yusupov R.M. *Intellektual'nyye tekhnologii monitoringa i upravleniya strukturnoy dinamiko slozhnykh ob"yektov* (Intelligent Technologies for Monitoring and Controlling the Structural Dynamics of Complex Objects), Moscow, 2006, 410 p. (in Russ.)
6. Ivanov D., Sokolov B.V. *International Journal of Production Research*, 2013, no. 9(51), pp. 2680–2697, DOI:10.1080/00207543.2012.737950.
7. Sokolov B.V., Pavlov A.N., Potryasaev S.A., Zakharov V.V. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2020, vol. 1156, pp. 234–243, DOI: 10.1007/978-3-030-50097-9_24.
8. Lee T.H., Adams G.E., Gaines W.M. *Computer Process Control: Modeling and optimization*, Wiley, 1968, 386 p.
9. Massel' L.V., Podkamennyy D.V. *Mashinostroyeniye i komp'yuternyye tekhnologii*, 2011, no. 4. (in Russ.)
10. Yusupov R.M., Musayev A.A. *Informatsionnyye tekhnologii v upravlenii (ITU-2018)* (Information Technologies in Management (ITU-2018)), Materials of the conference, St. Petersburg, 2018, pp. 74–85. (in Russ.)
11. Mikoni S.V., Sokolov B.V., Yusupov R.M. *Kvalimetriya modeley i polimodel'nykh kompleksov* (Qualimetry of Models and Polymodel Complexes), Moscow, 2018, 314 p. (in Russ.)
12. Rakhimov T.N., Zaikin O.A., Sovetov B.Ya. *Osnovy postroyeniya ASU* (The Basics of Building an ACS), Tashkent, 1984, 374 p. (in Russ.)
13. Shilov N.G. *Information and Control Systems*, 2016, no. 6(85). (in Russ.)
14. Zakharov V.V. *Journal of Instrument Engineering*, 2019, no. 10(62), pp. 167–172.
15. Zakharov V.V., Ushakov V.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2019, no. 6(62), pp. 585–588.
16. Sokolov B.V., Gnidenko A.S., Shalyto A.A. *Proceedings of the 5th Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering, AIEEE*, Latvia, Riga, November 24–25, 2017, IEEE, 2017, pp. 1–5.
17. <https://litsam.ru>.
18. Sokolov B.V., Zakharov V.V., Nazarov D.I. *Nauchnoe Priborostroenie* (Scientific Instrumentation) 2020, no. 3(30), pp. 49–62. (in Russ.)

Data on author

Valery V. Zakharov

— St. Petersburg Federal Research Center of the RAS, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS, Laboratory of Information Technologies in System Analysis and Modeling; Junior Researcher; E-mail: valeriov@yandex.ru

For citation: Zakharov V. V. Software and mathematical support for complex objects modernization. *Journal of Instrument Engineering*. 2020. Vol. 63, N 11. P. 975–984 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-11-975-984