

## МОДЕЛИ И ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПЛАНИРОВАНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ОПЕРАЦИЙ В КИБЕРФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Д. И. НАЗАРОВ

*Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН,  
199178, Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: dmnazarov23@gmail.com*

Предложено полимодельное описание функционирования киберфизических систем, представляющих собой многофункциональные аппаратно-программные комплексы, которые предназначены для приема (передачи), хранения и обработки информации, а также для формирования управляющих воздействий на объекты обслуживания, выполняющие заданное множество целевых задач и не входящие в состав киберфизической системы. В основу описания положена оригинальная динамическая интерпретация соответствующих процессов. Рассматривается этап планирования измерительно-вычислительных операций, имеющих особую значимость при решении задач управления объектами. Приводится информация о программном комплексе, обеспечивающем решение задачи оперативного планирования операций.

*Ключевые слова:* планирование измерительно-вычислительных операций, динамические модели, оптимальное программное управление, программные средства

**Введение.** В настоящее время основой цифрового производства и цифровой экономики в целом становятся различные классы киберфизических систем (КФС), в состав которых входят измерительные, телекоммуникационные и управляющие подсистемы [1, 2].

КФС — это автоматические системы управления, благодаря которым существующие и перспективные естественные и искусственные объекты живой и неживой природы могут быть объединены посредством многоканальных (проводных и беспроводных) измерительных систем с встроенным программным обеспечением в различные виды иерархически-сетевых структур. На основе КФС разрабатываются проекты „умного производства“, „умного дома“, „умной энергетики“, „умного транспорта“, „умной системы обеспечения безопасности жизни“, „умного здравоохранения“, „безопасных умных городов“, „умных“ объектов оборонного назначения и т.д. Такие системы позволяют обеспечить реализацию технологий управляемой самоорганизации движения транспорта, скоординированное функционирование производственного оборудования для эффективного выпуска небольших партий различных изделий, производство электроэнергии путем оптимизации загрузки тепловых, атомных и гидроэлектростанций и т.д. В этом случае измерительно-вычислительные подсистемы КФС могут рассматриваться как варианты интеллектуальных самоуправляемых систем, обладающих рядом особенностей. К этим особенностям относятся, в первую очередь, следующие [1, 2]:

- количество измерительных каналов в одной КФС может составлять от десятков до сотен единиц;
- измерительные каналы могут содержать датчики различных величин, как скалярных, так и тензорных, причем территориально датчики могут быть разнесены далеко друг от друга;
- измерительная информация может быть передана на большие расстояния по проводным или беспроводным каналам;

— обработка измерительной информации может осуществляться с использованием различных вычислительных технологий, в том числе и облачных, при этом сам процесс обработки должен быть близок к реальному масштабу времени.

Аналогичные особенности характерны и для управляющих подсистем КФС. Создание экономически эффективных КФС возможно лишь в том случае, если информация и знания, на которые они опираются, отличаются высокой достоверностью, поступают оперативно, а эксплуатационные затраты достаточно малы.

Важная роль в обеспечении качественного функционирования КФС отводится процессам управления, и в частности планированию работы данных систем. В настоящей статье остановимся лишь на рассмотрении задачи по составлению оперативного плана измерительно-вычислительных операций, как наиболее важного и трудоемкого этапа комплексного планирования работы КФС.

**Постановка задачи.** Пусть имеется множество объектов обслуживания:  $\tilde{A} = \{\tilde{A}_i, i \in \tilde{N}\}$ , входящих в состав некоторой группировки (например, объектов космического назначения), решающей совместно какую-либо конкретную целевую задачу (к примеру, мониторинг состояния эколого-экономических объектов). Для эффективной работы объектов обслуживания необходимо постоянно уточнять и корректировать бортовую навигационную информацию. Эту задачу выполняют аппаратно-программные комплексы КФС [1], обеспечивающие прием (передачу), хранение и обработку информации, а также формирование управляющих воздействий на объекты обслуживания, не входящие в состав КФС.

Введем множество КФС:

$$\tilde{B} = \{\tilde{B}_j, j \in \tilde{M}\}, \tilde{M} = \{1, \dots, \tilde{m}\}.$$

Благодаря наличию унифицированных аппаратно-программных средств информационного взаимодействия в составе объектов и КФС каждый из их элементов способен выполнять функции любого другого элемента в том или ином объеме в зависимости от складывающейся ситуации.

Для дальнейшего изложения введем обобщенное множество взаимодействующих объектов

$$B = \{B_l, l, i, j \in M = \tilde{N} \cup \tilde{K} \cup \tilde{M} = \{1, \dots, m\}\},$$

а также множество операций взаимодействия

$$D^{(i)} = \{D_\gamma^{(i)}, \gamma \in \Phi\}.$$

С учетом вышеизложенного задача планирования работы КФС может быть сформулирована следующим образом: необходимо найти такую допустимую программу управления измерительно-вычислительными операциями (которые являются подмножеством операций взаимодействия) и КФС (план их функционирования), в ходе реализации которой будут выполнены своевременно и полностью все операции, входящие в соответствующие технологические циклы управления объектами обслуживания, а качество обеспечения объектов необходимой информацией будет удовлетворять заданным требованиям. При этом если будет получено несколько допустимых программ управления КФС, то необходимо выбрать наилучшую (оптимальную) программу (план) в соответствии с принятыми критериями оптимальности.

**Динамические модели планирования работы КФС.** Формализацию задачи планирования будем проводить, используя предлагаемую в работах [1, 3, 4] динамическую интерпретацию процесса выполнения технических операций. Введем, исходя из постановки задачи планирования, следующие модели программного управления.

*Динамическая модель управления операциями взаимодействия (в том числе, вычислительными операциями):*

$$M_o = \mathbf{u}^{(o)}(t); \dot{\mathbf{x}}_{i\gamma}^{(o)} = \sum_{j=1}^m \varepsilon_{ij}(t) u_{i\gamma j}^{(o)}; x_{i\gamma}^{(o)}(t_0) = 0; x_{i\gamma}^{(o)}(t_f) = a_{i\gamma}^{(o)};$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{\gamma=1}^{s_i} u_{i\gamma j}^{(o)} \leq c_j^{(o,1)}; \sum_{j=1}^m \sum_{\gamma=1}^{s_j} u_{i\gamma j}^{(o)} \leq c_i^{(o,2)}; u_{i\gamma j}^{(o)}(t) \in \{0, 1\}; \quad (1)$$

$$u_{i\gamma j}^{(o)} \left[ \sum_{\bar{\alpha} \in \Gamma_{i\gamma 1}} (a_{i\bar{\alpha}}^{(o)} - x_{i\bar{\alpha}}^{(o)}) + \prod_{\bar{\beta} \in \Gamma_{i\gamma 2}} (a_{i\bar{\beta}}^{(o)} - x_{i\bar{\beta}}^{(o)}) \right] = 0, \quad i, j = 1, \dots, m; i \neq j; \gamma = 1, \dots, s_i,$$

где  $x_{i\gamma}^{(o)}$  — переменная, характеризующая состояние выполнения операций  $D_{\gamma}^{(i)}$ ;  $a_{\gamma}^{(o)}, a_{i\bar{\alpha}}^{(o)}, a_{i\bar{\beta}}^{(o)}$  — заданные объемы выполнения операций  $D_{\gamma}^{(i)}, D_{\bar{\alpha}}^{(i)}, D_{\bar{\beta}}^{(i)}$ ;  $u_{i\gamma j}^{(o)}(t)$  — управляющее воздействие:  $u_{i\gamma j}^{(o)}(t) = 1$ , если операция  $D_{\gamma}^{(i)}$  выполняется,  $u_{i\gamma j}^{(o)}(t) = 0$  — в противоположном случае;  $\Gamma_{i\gamma 1}, \Gamma_{i\gamma 2}$  — множество номеров операций взаимодействия, проводимых с объектом  $B_i$ , непосредственно предшествующих и технологически связанных с операцией  $D_{\gamma}^{(i)}$  с помощью логических операций „И“, „ИЛИ“ соответственно;  $c_j^{(o,1)}, c_i^{(o,2)}$  — заданные константы, характеризующие технические ограничения, связанные с функционированием КФС в целом;  $\varepsilon_{ij}(t)$  — известная матричная временная функция, с помощью которой задаются пространственно-временные ограничения, связанные с взаимодействием объектов  $B_i$  (либо  $\bar{B}_k$ ) и  $B_j$ , данная функции принимает значение „1“, если  $B_i$  попадает в заданную зону взаимодействия с  $B_j$ , „0“ — в противоположном случае.

*Динамическая модель управления параметрами измерительных операций:*

$$M_e = \mathbf{u}^{(e)}(t); \dot{\mathbf{x}}_i^{(g)} = F_i(t) \mathbf{x}_i^{(g)}; y_j^{(i)}(t) = \mathbf{d}_j^T(t) \mathbf{x}_i^{(g)} + \xi_j^{(e)};$$

$$\dot{Z}_i = -Z_i F_i - F_i^T Z_i - \sum_{j=1}^m \sum_{\tilde{\gamma} \in \Gamma_i} u_{i\tilde{\gamma} j}^{(e)} \frac{\mathbf{d}_j \mathbf{d}_j^T}{\sigma_j^2}; \quad i \neq j; i, j \in \tilde{M}; 0 \leq u_{i\tilde{\gamma} j}^{(e)} \leq c_{j\tilde{\gamma}}^{(e)} u_{i\tilde{\gamma} j}^{(o)}, \quad (2)$$

где  $\mathbf{x}_i^{(g)}$  — вектор состояния объекта  $A_i$ ;  $F_i(t)$  — заданная матрица, характеризующая динамику изменения переменных (вычисляемых параметров), описывающих состояние объекта (например, их пространственное положение);  $\xi_j^{(e)}$  — некоррелированные ошибки измерений параметров объекта, проводимых с использованием технических средств  $B_j$  КФС; предполагается, что ошибки измерений подчиняются нормальному закону распределения с нулевым математическим ожиданием и дисперсией, равной  $\sigma_j^2$ ;  $u_{i\tilde{\gamma} j}^{(e)}(t)$  — управляющее воздействие, задающее интенсивность проведения дистанционных измерений параметров  $y_j^{(i)}(t)$  объекта (например, дальности до объекта, температуры и влажности на его борту) с помощью технических средств  $B_j$  КФС;  $c_{j\tilde{\gamma}}^{(e)}$  — заданные величины, характеризующие технические возможности средств  $B_j$  при проведении операции  $D_{\tilde{\gamma}}^{(i)}$ ;  $Z_i$  — матрица, обратная по отношению к корреляционной матрице  $K_i(t)$  ошибок оценки вектора состояния объекта  $A_i$ ;  $\Gamma_i$  — множество операций взаимодействия, проводимых КФС с объектом  $A_i$ ;  $\mathbf{d}_j(t)$  — заданный вектор,

определяющий особенности технической реализации устройства, осуществляющего измерение параметров объекта  $A_i$ .

Основное отличие модели (2) от известных состоит в том, что в ней операции измерения параметров состояния объекта обслуживания с учетом ограничения на управляющие воздействия  $u_{i\tilde{\gamma}}^{(e)}$  непосредственно связываются с измерительно-вычислительными операциями (далее — ИВ-операции), выполняемыми КФС и задаваемыми в модели (1). Это позволяет с единых системных позиций исследовать как задачу планирования ИВ-операций, так и задачи планирования измерений параметров контролируемых объектов.

Для оценивания качества процессов программного управления ИВ-операциями КФС (иными словами, качества оперативного планирования ИВ-операций) на основе построенных динамических моделей могут быть использованы различные целевые функции (показатели качества) [5—8]. Приведем для примера некоторые из них:

$$J_1^{(o)} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \sum_{\gamma=1}^{s_i} \left\{ [a_{i\gamma}^{(o)} - x_{i\gamma}^{(o)}(t_f)]^2 + \sum_{j=1}^m \int_{t_0}^{t_f} \eta_{i\gamma}(\tau) u_{i\gamma j}^{(o)}(\tau) d\tau \right\}, \quad i \neq j; \quad (3)$$

$$J_2^{(e)} = \mathbf{b}_\gamma^T K_i(t_f) \mathbf{b}_\gamma; \quad J_3^{(e)} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \sum_{\tilde{\gamma} \in D^{(i)}} \int_{t_0}^{t_f} u_{i\tilde{\gamma} j}^{(e)}(\tau) d\tau, \quad j \neq i, \quad (4)$$

где  $\eta_{i\gamma}(\tau)$  — известные монотонные функции времени, которые выбираются с учетом заданных сроков выполнения операций взаимодействия объекта с КФС; следует отметить, что показатель (3) вводится в случае, если необходимо оценить качество выполнения граничных условий, а также величину суммарного штрафа за невыполнение заданных сроков.

**Постановка задачи планирования измерительно-вычислительных операций.** На основе приведенных частных динамических моделей запишем обобщенную динамическую модель процессов взаимодействия КФС с объектом обслуживания:

$$M = \left\{ \mathbf{u}(t) \mid \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t); \quad \mathbf{h}_0(\mathbf{x}(t_0)) \leq \mathbf{O}; \quad \mathbf{h}_1(\mathbf{x}(t_f)) \leq \mathbf{O}, \quad \mathbf{q}^{(1)}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \mathbf{O}; \quad \mathbf{q}^{(2)}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \leq \mathbf{O} \right\}, \quad (5)$$

где  $\mathbf{x} = \|\mathbf{x}^{(o)T} \mathbf{x}^{(e)T}\|^T$ ;  $\mathbf{u} = \|\mathbf{u}^{(o)T} \mathbf{u}^{(e)T}\|^T$  — обобщенные вектор состояния КФС и вектор управления системой, компонентами которых являются соответствующие переменные, входящие в модели  $M_o, M_e$ ;  $\mathbf{h}_0, \mathbf{h}_1$  — известные вектор-функции, с помощью которых задаются краевые условия для вектора  $\mathbf{x}$  в моменты времени  $t = t_0$  и  $t = t_f$ ;  $\mathbf{q}^{(1)}, \mathbf{q}^{(2)}$  — векторные функции, с помощью которых задаются основные пространственно-временные, технические и технологические ограничения, накладываемые на процесс функционирования КФС и объекта; вектор  $\mathbf{O}$  описывает указанные ограничения.

Кроме выражения (5), в состав детерминированной динамической модели планирования ИВ-операций должна входить система показателей качества планирования работы КФС, задаваемая обобщенным векторным показателем

$$\mathbf{J}_{об} = \|\mathbf{J}_1^{(o)} \mathbf{J}_2^{(e)} \mathbf{J}_3^{(e)}\|^T, \quad (6)$$

компонентами которого являются частные показатели качества (3), (4).

В этом случае задача планирования может быть сформулирована как задача программного управления динамической системой (1), (2): необходимо найти допустимое управление  $\mathbf{u}(t)$ ,  $t \in (t_0, t_f]$ , которое удовлетворяет требуемым ограничениям  $\mathbf{q}^{(1)}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \mathbf{O}$ ,  $\mathbf{q}^{(2)}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \mathbf{O}$  и переводит динамическую систему  $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t)$  из заданного начального со-

стояния  $\mathbf{h}_0$  в заданное конечное состояние  $\mathbf{h}_1$ . Если таких управляющих воздействий (планов) будет несколько, то среди них необходимо выбрать оптимальное, при котором компоненты обобщенного вектора (6) примут экстремальные значения. Следует отметить, что качественному анализу поставленной задачи предшествовала скаляризация векторного показателя (6) [3].

Как показано в работах [3, 4, 9], задачу планирования операций и распределения ресурсов сложных технических систем (в том числе, КФС) можно с помощью принципа максимума Понтрягина свести к двухточечной краевой задаче. В этом случае задача планирования ИВ-операций формулируется как задача поиска оптимального программного управления, обеспечивающего требуемую точность определения местоположения КФС и объекта обслуживания за минимальное время (либо с минимальными энергетическими затратами на выполнение операций). Традиционно задачи данного класса (задачи теории расписаний) решаются с помощью методов математического программирования. Использование методов теории оптимального управления для решения задач теории расписаний, что и предлагается в настоящей работе, позволяет повысить качество результатов планирования (в том числе, повысить оперативность получения плана и сократить затраты ресурсов при его реализации). На основе результатов исследований [3, 4, 9—12] разработаны комбинированный алгоритм решения задачи планирования ИВ-операций, базирующийся на методе последовательных приближений и методе ветвей и границ, а также соответствующий программный комплекс для реализации этого алгоритма.

**Программный комплекс.** В соответствии с предложенным полимодельным комплексом программного управления измерительно-вычислительными операциями, выполняемыми в КФС, разработанный прототип оперирует следующими классами объектов:

- объекты обслуживания;
- пункты обслуживания;
- измерительные операции;
- вычислительные операции;
- ресурсы различной природы.

Результатом работы комплекса является наилучшая (согласно выбранным критериям оптимальности) программа управления, представленная в виде расписания (плана) выполнения операций.

Программный комплекс написан на языке C++. Для хранения результатов используется база данных SQLite, для визуализации результатов планирования — библиотеки Qt и OpenGL.

На этапе проектирования прототипа программного комплекса была составлена его объектно-ориентированная спецификация.

В состав комплекса входят следующие модули:

- модуль реализации вычислительных алгоритмов, состоящий из двух подмодулей: реализации эвристических алгоритмов и реализации алгоритмов динамического планирования, — предназначен для проведения расчетов по заданным алгоритмам;
- модуль управления параметрами модели — предназначен для редактирования входных данных моделей, используемых в программном комплексе; через этот модуль осуществляется взаимодействие с базой данных результатов планирования и моделирования;
- модуль пользовательского интерфейса редактора модели — предназначен для отображения и редактирования пользователем текущих входных параметров динамических моделей, используемых при расчетах;
- модуль пользовательского интерфейса визуализации результатов — предназначен для визуализации результатов планирования и моделирования, хранящихся в базе данных;

— модуль взаимодействия с базой данных SQLite — предназначен для осуществления взаимодействия с базой данных результатов планирования и моделирования; в модуле реализовано преобразование структур данных программы, имеющих внутреннее представление, в структуры, хранимые в базе данных;

— модуль экспорта результатов в XML — предназначен для конвертации полученных результатов планирования и моделирования в формат XML для дальнейшей обработки данных с помощью стороннего программного обеспечения.

**Пример.** Рассмотрим решение задачи оценивания информационно-технологических возможностей системы на примере наземного комплекса управления группировкой объектов обслуживания. Пользователем осуществляется ввод входных данных о составе группировки, положении и количестве пунктов обслуживания и их характеристиках, а также о составе и параметрах операций, входящих в технологический цикл управления.

На основе параметров объектов производится моделирование их движения в течение указанного интервала планирования. Пользователю доступна визуализация полученных результатов моделирования движения объектов для оценивания потенциального времени взаимодействия между ними и пунктами обслуживания. Далее на основе результатов моделирования движения объектов определяются области их потенциального взаимодействия с пунктами обслуживания; график оценки потенциальных зон их взаимодействия на заданном интервале планирования представлен на рис. 1, где по оси абсцисс отложен номер витка  $n$ , а по оси ординат — время взаимодействия  $t$ .

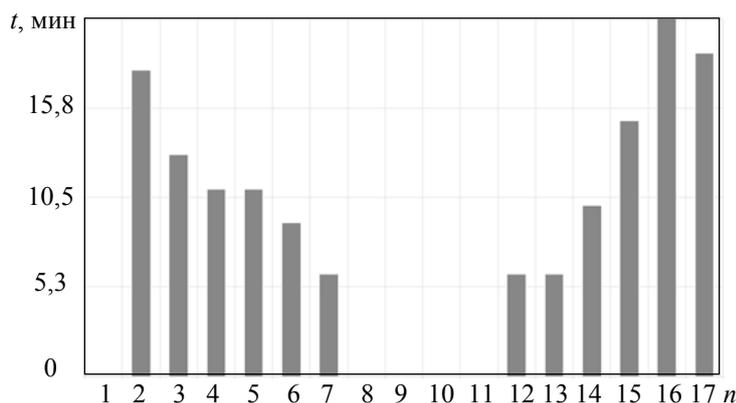


Рис. 1

С учетом полученных результатов строится эвристический план программного управления измерительно-вычислительными операциями в КФС. Далее с использованием принципа максимума Понтрягина производится оптимизация полученного плана. Результаты планирования работы КФС продемонстрированы на рис. 2 в виде диаграммы Ганта (здесь НРТК — наземный радиотехнический комплекс).

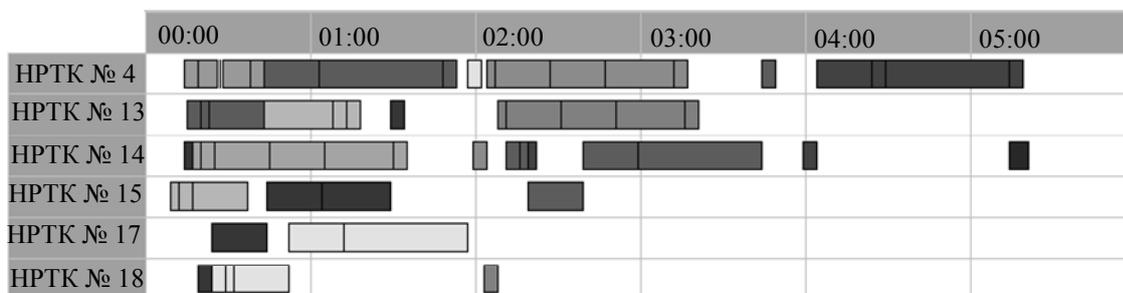


Рис. 2

Качество измерительной информации, полученной в ходе реализации сформированного плана функционирования КФС, подтверждается рядом экспериментов. В частности, график,

представленный на рис. 3, показывает, что уменьшение коэффициентов в корреляционной матрице ошибок измерителя напрямую приводит к улучшению качества измерений.

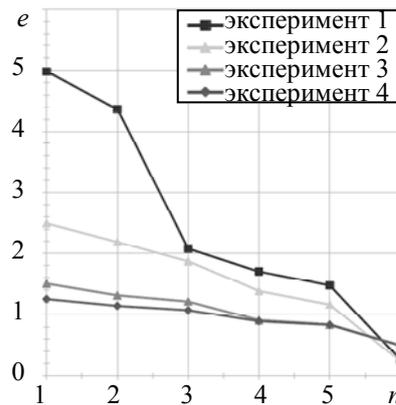


Рис. 3

**Заключение.** Представлено полимодельное описание и результаты решения задачи планирования измерительно-вычислительных операций в киберфизической системе. Основные особенности предлагаемых моделей состоят в том, что при динамической интерпретации процессов выполнения ИВ-операций, входящих в технологический цикл КФС, существенно сокращается размерность решаемых задач и степень связности алгоритма планирования. При решении задачи планирования данная размерность определяется в каждый момент времени числом независимых путей в обобщенном сетевом графике выполняемых системой работ и текущими пространственно-временными, техническими, технологическими ограничениями. Исследования свойств и характеристик предложенных моделей показали, что за счет рационального (оптимального) планирования работы КФС, во-первых, повышается пропускная способность системы в целом, во-вторых, снижаются запаздывания в контурах управления системой, в-третьих, уменьшается возможность возникновения пиковых информационных нагрузок при внезапных изменениях ее структуры. Кроме того, на основе динамического описания процессов функционирования КФС удастся в явном виде связать технологию управления ее элементами и подсистемами с результатами целевого применения объектов обслуживания, а также с характеристиками аппаратно-программных комплексов КФС. При этом одновременное планирование ИВ-операций позволяет сформировать требования к характеристикам КФС. С информацией о практических реализациях предложенного подхода к решению задач теории расписаний, возникающих в различных предметных областях (космонавтика, судостроение, государственное управление и т.п.), можно ознакомиться на сайте <http://litsam.ru>

Исследования выполнены при финансовой поддержке бюджетной темы № 0073–2018–0003.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куприяновский В. П., Намиот Д. Е., Синягов С. А. Киберфизические системы как основа цифровой экономики // Intern. Journal of Open Information Technologies. 2016. Vol. 4, N 2. P. 18–24.
2. Wolf W. Cyber-physical systems // Computer. 2009. N 3. P. 88–89.
3. Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006.
4. Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Комплексное моделирование функционирования автоматизированной системы управления навигационными космическими аппаратами // Проблемы управления и информатики. 2002. № 5. С. 103–117.
5. Ли Э. Б., Маркус Л. Основы теории оптимального управления. М.: Наука, 1972.

6. Ackoff R. L. *The Art of Problem Solving*. N. Y.: Wiley-Interscience, 1978.
7. Танаев В. С., Шкурба В. В. *Введение в теорию расписаний*. М.: Наука, 1975.
8. Черноусько Ф. Л., Колмановский В. Б. *Оптимальное управление при случайных возмущениях*. М.: Наука, 1978.
9. Калинин В. Н., Соколов Б. В. Динамическая модель и алгоритм оптимального планирования комплекса работ с запретами на прерывание // *Автоматика и телемеханика*. 1987. № 1. С. 106—114.
10. Болтянский В. Г. *Математические методы оптимального управления*. М.: Наука, 1969.
11. Любушин А. А. Модификация и исследование сходимости метода последовательных приближений для задач оптимального управления // *Журн. вычисл. математики и матем. физики*. 1979. Т. 19, № 6. С. 1414—1421.
12. Малышев В. В., Красильщиков М. Н., Карлов В. И. *Оптимизация наблюдения и управления летательных аппаратов*. М.: Машиностроение, 1989.

#### Сведения об авторе

Дмитрий Игоревич Назаров — аспирант; СПИИРАН; лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании; E-mail: dmnazarov23@gmail.com

Поступила в редакцию  
27.08.18 г.

**Ссылка для цитирования:** Назаров Д. И. Модели и программный комплекс решения задач планирования измерительно-вычислительных операций в киберфизических системах // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2018. Т. 61, № 11. С. 947—955.

### MODELS AND PROGRAM COMPLEX FOR SOLVING PLANNING PROBLEMS OF MEASURING AND COMPUTING OPERATIONS IN CYBER-PHYSICAL SYSTEMS

D. I. Nazarov

*St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS,  
199178, St. Petersburg, Russia  
E-mail: dmnazarov23@gmail.com*

A poly-model description is proposed for functioning of cyber-physical systems. The systems under consideration are multifunctional hardware-software complexes designed to receive (transmit), store, and process information, as well as to generate control actions on the objects of service that perform a given set of targets and are not parts of the cyber-physical system. The description is based on a novel dynamic interpretation of the relevant processes. The stage of planning of measuring and computing operations carried out by the cyber-physical system to determine its location and position, is considered in view of special importance of the operations in solution to the problems of control over the objects. An information on the software complex providing solutions to the problem of operational planning of measuring and computing tasks, is presented.

**Keywords:** planning of measuring and computing operations, dynamic models, optimal program control, program means

#### REFERENCES

1. Kupriyanovskiy V.P., Namiot D.E., Sinyagov S.A. *Intern. Journal of Open Information Technologies*, 2016, no. 2(4), pp. 18–24. (in Russ.)
2. Wolf W. *Computer*, 2009, no. 3, pp. 88–89.
3. Okhtilev M.Yu., Sokolov B.V., Yusupov R.M. *Intellektual'nye tekhnologii monitoringa i upravleniya strukturnoy dinamiko slozhnykh tekhnicheskikh ob'ektov* (Intellectual Technologies of Monitoring and Management of Structural Dynamics of Complex Technical objects), Moscow, 2006, 410 p. (in Russ.)
4. Sokolov B.V., Yusupov R.M. *Journal of automation and information sciences*, 2002, no. 5-12(34), pp. 103–117. (in Russ.)
5. Lee E.B., Markus L. *Foundations of optimal control theory*, NY, London, Sydney, John Wiley and Sons, Inc., 1967.
6. Ackoff R.L. *The art of problem solving*, NY, Wiley-Interscience, 1978.
7. Tanayev V.S., Shkurba V.V. *Vvedeniye v teoriyu raspisaniy* (Introduction to Scheduling Theory), Moscow, 1975. (in Russ.)
8. Chernous'ko F.L., Kolmanovskiy V.B. *Optimal'noye upravleniye pri sluchaynykh vozmushcheniyakh* (Optimal Control for Random Perturbations), Moscow, 1978. (in Russ.)

9. Kalinin V.N., Sokolov B.V. *Automation and Remote Control*, 1987, no. 1, pp. 106–114. (in Russ.)
10. Boltyanskiy V.G. *Matematicheskiye metody optimal'nogo upravleniya* (Mathematical Methods of Optimal Control), Moscow, 1969. (in Russ.)
11. Lyubushin A.A. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 1979, no. 6(19), pp. 1414–1421.
12. Malyshev V.V., Krasil'shchikov M.N., Karlov V.I. *Optimizatsiya nablyudeniya i upravleniya letatel'nykh apparatov* (Optimization of Aircraft Monitoring and Control), Moscow, 1989. (in Russ.)

**Data on author**

**Dmitriy I. Nazarov** — Post-Graduate Student; St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS, Laboratory of Information Technologies in Systems Analysis and Modeling; E-mail: dmnazarov23@gmail.com

**For citation:** Nazarov D. I. Models and program complex for solving planning problems of measuring and computing operations in cyber-physical systems. *Journal of Instrument Engineering*. 2018. Vol. 61, N 11. P. 947—955 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-11-947-955