

Моделирование и оптимизация модулей и информационных массивов в киберфизической системе

Т. В. Аветисян, Я. Е. Львович, А. П. Преображенский, Ю. П. Преображенский

Воронежский институт высоких технологий
394043, Россия, г. Воронеж, ул. Ленина, 73а

Аннотация. В настоящее время в производственной сфере мы можем наблюдать внедрение и активное развитие элементов киберфизических систем. В такой системе происходит процесс циркуляции больших объемов данных. В статье рассмотрены особенности решения задач, связанных с оптимизацией процессов обработки информации в киберфизических системах на производственных предприятиях. Необходимо решить задачи оптимизации ресурсов, используемых при формировании киберфизических систем на основе входящих в них компонентов. Рассмотрены два этапа. На первом этапе проводится решение динамических задач, связанных с тем, что осуществляется синтез модулей киберфизической системы. Второй этап связан с тем, что информационные массивы в киберфизической системе должны быть оптимальным образом размещены в модуле управления. Представленный в работе подход может быть применен в ходе анализа различных киберфизических систем.

Ключевые слова: моделирование, оптимизация, киберфизическая система, информация, управление

Поступила 16.10.2023, одобрена после рецензирования 28.11.2023, принята к публикации 08.12.2023

Для цитирования. Аветисян Т. В., Львович Я. Е., Преображенский А. П., Преображенский Ю. П. Моделирование и оптимизация модулей и информационных массивов в киберфизической системе // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2023. № 6(116). С. 116–124. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-116-124

MSC: 65–11

Review article

Modeling and optimization of modules and information arrays in a cyberphysical system

T.V. Avetisyan, Ya.E. Lvovich, A.P. Preobrazhensky, Yu.P. Preobrazhensky

Voronezh Institute of High Technologies
394043, Russia, Voronezh, 73a Lenina street

Abstract. Nowadays in the production sphere we can observe the introduction and active development of elements of cyber-physical systems. In such a system there is a process of circulation of large amounts of data. The article considers the peculiarities of solving problems related to the optimization of information processing in cyber-physical systems at manufacturing enterprises. It is necessary to solve the problems of optimization of resources used in the formation of cyber-physical systems on the basis of components included in them. Two stages are considered. At the first stage, the solution of dynamic problems related to the fact that the synthesis of cyber-physical system modules is carried out. The second stage is related to the fact that information arrays in the cyber-physical system should be optimally placed in the control module. The approach presented in this paper can be applied in the course of analyzing various cyber-physical systems.

Keywords: modeling, optimization, cyber-physical system, information, control

Submitted 16.10.2023,

approved after reviewing 28.11.2023,

accepted for publication 08.12.2023

For citation. Avetisyan T.V., Lvovich Ya.E., Preobrazhensky A.P., Preobrazhensky Yu.P. Modeling and optimization of modules and information arrays in a cyberphysical system. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2023. No. 6(116). Pp. 116–124. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-116-124

ВВЕДЕНИЕ

Когда синтезируются информационные массивы внутри киберфизических систем, требуется решение нескольких задач. Важно в этих массивах определить содержание, рассмотреть особенности их организации, построение алгоритмов поиска информации, осуществить размещение информации внутри памяти модулей, входящих в состав киберфизических систем. Модули могут входить в структуру различным образом. Одним из ключевых параметров является время обмена информацией между модулями. Эффективность функционирования киберфизических систем может быть повышена за счет осуществления процедуры оптимального синтеза при учете состава модулей, особенностей связей между ними и уменьшения времени передачи информации.

Можно выделить несколько этапов в ходе решения задач.

На первом этапе проводится решение динамических задач, связанных с тем, что осуществляется синтез модулей киберфизической системы. При этом каждый из модулей используется с определенной частотой, им ставятся в соответствие информационные массивы, которых задано определенное количество. Минимизацию обмена между элементами памяти и памятью в модуле управления можно рассматривать в виде критерия оптимизации, когда решается такая задача.

Второй этап связан с тем, что информационные массивы в киберфизической системе должны быть оптимальным образом размещены внутри модуля управления. При решении таких задач ориентируются на соответствующие критерии. Они связаны или с минимизацией затрат, необходимых для использования информационных массивов или с минимизацией времени, которое требуется для того, чтобы осуществить обмен с модулем управления.

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ, СВЯЗАННЫХ С ТЕМ, КАК ВЕДЕТСЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ В КИБЕРФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Можно указать, что когда ведется проектирование по киберфизическим системам, в ряде случаев требуется привлечение интеграционных подходов. Например, если рассматривается теория проектирования Девопс [1], то в ней учитывается, что разрыв будет уменьшаться среди разработок и осуществлением модернизации, которая есть внутри жизненного цикла. Когда рассматривают практическое использование, то осуществляют переходы от водопадных моделей к применению циклических и спиральных моделей [2]. Есть другие подходы, основанные на ITIL (Information Technology Infrastructure Library – библиотека инфраструктуры информационных технологий). Тогда возникают возможности для того, чтобы снижать разрыв по этапам в ходе реализации жизненного цикла в киберфизических системах [3, 4]. В существующих условиях есть методики, связанные с тем, что учитываются свойства варибельности (agility), которые относятся к киберфизическим системам [5]. Необходимо, чтобы целостность данных была обеспечена в ходе привлечения протоколов управления, которые связаны с киберфизическими системами [6]. Представляет интерес проведение анализа по тому, как использовать модули в киберфизических системах для получения больших значений эффективности.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОДУЛЕЙ И МАССИВОВ
В КИБЕРФИЗИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

При определении количества и содержания информационных массивов дадим постановку соответствующей задачи. Будем считать, что в состав киберфизической системы входит множество модулей $M = \{m_1, m_2, \dots, m_v, \dots, m_V\}$. Они функционируют с определенной частотой Q_v , $v = \overline{1, V}$. Рассматривается множество информационных элементов $D = \{d_1, d_2, \dots, d_z, \dots, d_Z\}$. Используется матрица, на основе которой информационные элементы будут осуществлять связь с модулями киберфизической системы $B = ||b_{vz}||$. В ней $b_{vz} = 1$, если происходит считывание или запись v -м модулем z -го информационного элемента, в противном случае $b_{vz} = 0$. $U = \{u_1, u_2, \dots, u_z, \dots, u_Z\}$ рассматривается в виде вектора. Для него размеры информационных элементов, которые анализируются, будут определяться на основе компонентов [1, 2].

Множества информационных элементов, которые оптимальным образом распределены, должны быть определены внутри информационных массивов. При этом необходимо выполнение условия по минимальному числу обменов системы модулей киберфизической системы с управляющим модулем с учетом того, что существуют ограничения по размерам и сложности информационных массивов.

Есть возможности для того, чтобы применять описание на основе двудольного графа $G(M, D, B^{m(a)})$. В нем $M = \{m_v, v = \overline{1, V}\}$ является множеством модулей в киберфизической системе, $D = \{d_z, z = \overline{1, Z}\}$ рассматривается как множество информационных элементов в киберфизической системе, на основе множества дуг $B^{m(a)}$ происходит определение связей информационных элементов и модулей. При этом применяется матрица смежности $B^{m(a)} = ||b_{vz}^{m(a)}||$.

Если анализировать графовую задачу, то в ней можно обозначить соответствующую формулировку. Необходимо по двудольному графу провести процесс синтеза. При этом важно обеспечить минимальное число дуг. Для информационных массивов, в зависимости от их размеров и сложности, будут существовать соответствующие ограничения. Множество информационных массивов, которое рассматривается, представляется как $B = \{b_s, s = \overline{1, S}\}$, множество массивов и множество модулей будут связываться на основе соответствующего множества дуг $K^{m(a)}$. При этом необходимо определить матрицу смежности $K = ||k_{vs}^{m(a)}||$. Можно определить переменные таким образом: $k_{vs}^{m(a)} = 1$ при выполнении условия $\sum_{z=1}^Z b_{vz}^{m(a)} \cdot x_{zs} \geq 1$ и $k_{vs}^{m(a)} = 0$ при выполнении условия $\sum_{z=1}^Z b_{vz}^{m(a)} \cdot x_{zs} = 0$. В случае, когда в s -й массив происходит распределение z -го информационного элемента, будем считать, что $x_{zs} = 1$. В противном случае $x_{zs} = 0$. Тогда есть возможность задачу синтеза сформулировать таким образом:

$$\min_{\{x_{zs}\}} \sum_{v=1}^V \sum_{s=1}^S Q_v (k_{vs}^m + k_{vs}^a) \Sigma, \quad (1)$$

с учетом ограничений: N_s – по общему числу информационных элементов внутри массива:

$$\sum_{z=1}^Z x_{zs} \leq N_s, \quad s = \overline{1, S}, \quad (2)$$

$N1_s$ – по объему массива:

$$\sum_{z=1}^Z \beta_z \cdot x_{zs} \leq N1_s, \quad s = \overline{1, S}, \quad (3)$$

по дублированию элементов для различных массивов:

$$\sum_{s=1}^S x_{zs} = 1, \quad \forall_z = \overline{1, Z}, \quad (4)$$

по совместимости элементов внутри одного массива:

$$x_{zs} + x_{z's} \leq 1 \quad (5)$$

с учетом того, заданы d_z и $d_{z'}$ – модули киберфизической системы.

Тогда можно говорить о том, что мы пришли к задаче нелинейного программирования. По ней получение точного решения может быть обеспечено на основе схемы «ветвей и границ». Применяется такая схема для того, чтобы осуществлять процесс ветвления. Первый элемент соответствует первому массиву. Второй элемент соответствует первому или второму массиву. Третий элемент соответствует первому, второму или третьему массиву и т.д.

Для всего множества решений в задаче требуется указание точной нижней оценки $E1$. Она определяется таким образом:

$$E1 = 2 \cdot \sum_{v=1}^V Q_v.$$

В случае, когда все информационные элементы распределяются, такая оценка может быть получена. Эти элементы будут в одном массиве при обработке внутри модулей информационной системы. Когда каждый из информационных элементов будет распределен в отдельный массив, то по задаче можно получить точную оценку $E2$ во всем множестве решений:

$$E1 = \sum_{v=1}^V \sum_{s=1}^S Q_v \cdot b_{vz}.$$

Чтобы для u -й вершины ветвления дать оценку по любому из подмножеств решений E_u , необходимо использовать такое выражение [3–4]

$$E_u = E1 + \Delta E_u,$$

здесь ΔE_u – рассматривается для u -й вершины, в которой осуществляется ветвление.

Существует зависимость значения ΔE_u от того, какое множество переменных $\{x_{zs}\}$, которые относятся к u -й вершине, когда реализуется процесс ветвления. Вычисление ΔE_u реализуется следующим способом:

$$\Delta E_u = \sum_{v=1}^V Q_v (P_v^m + P_v^a).$$

Здесь $P_v^{m(a)} = k_{vz}^{m(a)} - 1$, когда $\sum_{z=1}^{W_u} k_{vz}^{m(a)} - 1 > 0$, $P_v^{m(a)} = 0$, когда $\sum_{z=1}^{W_u} k_{vz}^{m(a)} - 1 \leq 0$, W_u рассматривается в виде количества формируемых массивов, которые будут относиться к u -й вершине, когда реализуется процесс ветвления.

Мы исходим из того, получено решение задачи, формулы (1)–(5), которое представляется соответствующим образом. Следующим шагом является переход к решению задачи, когда полученные массивы будут организованы с использованием оптимальных подходов. Необходимо, чтобы происходила их загрузка в управляющий модуль.

Внутри модулей киберфизической системы необходимо стремиться к тому, чтобы было минимизировано время, в течение которого происходит обработка данных. Помимо этого, важно, чтобы при использовании, хранении и формировании информационных массивов обеспечивалась минимизация по общим затратам. Это может считаться критериями при рассмотрении соответствующих задач.

Дадим обозначения, которые используются при рассмотрении в ходе реализации решения.

При обработке данных происходит рассмотрение множества задач $I = \{1, 2, \dots, i, \dots, I_0\}$, если для киберфизической системы к задаче i модуль v будет относиться, то в матрице $N = ||n_{iv}||$ значение $n_{iv} = 1$, иначе $n_{iv} = 0$, при записи в модуль v информационного массива z в матрице $M = ||m_{iv}^{m(a)}||$ значение $m_{iv}^{m(a)} = 1$, иначе $m_{iv}^{m(a)} = 0$. В анализируемой системе частота решения задачи будет P_i . По v -му модулю будет частота применения q_{vi} при решении i -й задачи. В случае формирования z -го информационного массива число информационных элементов будет N_z . С учетом этого, L_z показывает в z -м информационном массиве число записей, тогда $R_z = N_z L_z$ соответствует в информационном массиве объему. C_0 – в вычислительном устройстве значение стоимости единицы времени. C_θ – в θ -м модуле памяти значение стоимости времени. S_θ – в θ -м модуле памяти значение стоимости памяти. $\tau_{v\theta}$ – время передачи информации для v -го модуля киберфизической системы от θ -го модуля памяти. $\tau_{z\mu}^{\theta(m),a} = 0$, $\tau_{z\mu\theta}$ – показывает при использовании θ -го модуля памяти с привлечением μ -го способа время передачи информации, которое соответствует z -му информационному массиву. T_v – вычислительное время, которое относится к v -му модулю в киберфизической системе. d_v – размер модуля в киберфизической системе. $\Delta\tau_v$ – вычислительное время, которое связано с поиском v -го модуля в киберфизической системе. $\Delta\tau_z$ – вычислительное время, связанное с тем, что считывается z -й информационный массив. $\Delta\tau_z^m$ – вычислительное время, связанное с тем, что происходит считывание z -го информационного массива. $\Delta\tau_z^a$ – вычислительное время, связанное с тем, что происходит запись z -го информационного массива.

Используем альтернативные переменные: $x_{z\mu}^\theta = 1$, если организация информационного массива осуществляется на основе μ -го метода, $x_{z\mu}^\theta = 0$ – в противном случае, $y_v^\theta = 1$, если v -й модуль в киберфизической системе содержит θ -й модуль памяти, $y_v^\theta = 0$ – в противном случае [6–8].

Тогда можно рассмотреть задачу, которая связана с тем, каким образом будут выбираться оптимальные подходы по формированию структуры информационных массивов, обеспечению связей между модулями в киберфизической системе и информационными массивами с учетом требований по минимизации затрат всей системы.

Для того чтобы определить полные затраты, необходимо рассмотреть сумму основных затрат C_1 и затрат на функционирование C_2 . Чтобы определить затраты C_1 , требуется опираться на следующее выражение:

$$C_1 = \sum_{\theta=1}^{\theta_0} S_\theta \cdot \left(\sum_{v=1}^V d_v y_v^\theta + \sum_{s=1}^S \sum_{\mu=1}^{\mu_0} R_s x_{s\mu}^\theta \right) \cdot d_\theta^{-1}.$$

В затратах C_2 мы можем выделить следующие компоненты: стоимость работы вычислительного устройства C_{21} , стоимость формирования адресной таблицы C_1 , стоимость процессов чтения и записи между модулями в киберфизической системе и управляющим модулем C_{23} . Чтобы указанные компоненты были определены, необходимо опираться на следующие выражения [9–11]:

$$C_{21} = C_0 \cdot \sum_{i=1}^I P_i \cdot \sum_{v=1}^V n_{iv} \cdot g_v^i \cdot T_v = C_0 \cdot \sum_{v=1}^V Q_v \cdot T_v,$$

$$C_{23} = \sum_{\theta=1}^{\theta_0} C_{\theta} \left\{ \sum_{i=1}^{I_0} P_i \sum_{v=1}^V n_{iv} g_{iv} \left[(\tau_v^{\theta} y_v^{\theta} + \sum_{s=1}^S \sum_{\mu=1}^{\mu_0} (m_{vs}^m t_{s\mu}^{\theta(m)} + m_{vs}^a t_{s\mu}^{\theta(a)})) \right] \right\} =$$

$$= \sum_{\theta=1}^{\theta_0} C_{\theta} \left\{ \sum_{v=1}^V Q_v \left[(\tau_v^{\theta} y_v^{\theta} + \sum_{s=1}^S \sum_{\mu=1}^{\mu_0} (m_{vs}^m t_{s\mu}^{\theta(m)} + m_{vs}^a t_{s\mu}^{\theta(a)})) \right] \right\},$$

$$C_1 = C_0 \cdot \left[\sum_{i=1}^I P_i \cdot \sum_{v=1}^V n_{iv} \cdot g_v^i \cdot \Delta \tau_v + \sum_{i=1}^I P_i \cdot \sum_{v=1}^V n_{iv} \cdot g_v^i \cdot (m_{vs}^m \Delta t_s^m + m_{vs}^a t_s^a) \right].$$

После преобразований получаем

$$\min_{\{y_v^{\theta}, x_{s\mu}^{\theta}\}} \left\{ \left[\sum_{v=1}^V d_v y_v^{\theta} + \sum_{s=1}^S \sum_{\mu=1}^{\mu_0} R_s x_{s\mu}^{\theta} \right] + d_{\theta}^{-1} \right\} +$$

$$+ \sum_{\theta=1}^{\theta_0} C_{\theta} \left\{ \sum_{v=1}^V Q_v \left[(\tau_v^{\theta} y_v^{\theta} + \sum_{s=1}^S \sum_{\mu=1}^{\mu_0} (m_{vs}^m t_{s\mu}^{\theta(m)} + m_{vs}^a t_{s\mu}^{\theta(a)})) \right] \right\} \quad (6)$$

с учетом ограничений: T_i – время, которое требуется для передачи информации от модулей киберфизической системы к управляющему модулю, когда будет решаться i -я задача:

$$\sum_{v=1}^V n_{iv} g_{iv} \left[(\tau_v^{\theta} y_v^{\theta} + \sum_{s=1}^S \sum_{\mu=1}^{\mu_0} (m_{vs}^m t_{s\mu}^{\theta(m)} + m_{vs}^a t_{s\mu}^{\theta(a)})) \right] \leq T_i, \quad (7)$$

G_v – по применяемому модулю памяти θ -го типа:

$$\sum_{v=1}^V a_v y_v^{\theta} + \sum_{s=1}^S \sum_{\mu=1}^{\mu_0} R_s x_{s\mu}^{\theta} \leq G^{\theta}, \theta = 1, 2, \dots, \theta_0, \quad (8)$$

по совместному взаимодействию модулей киберфизической системы, информационных массивов с модулем памяти θ -го типа:

$$y_v^{\theta} + x_{s\mu}^{\theta} \leq 1, \quad (9)$$

когда будут рассматриваться различные носители, на которых размещаются модули памяти киберфизической системы, то задаются v и (s, μ) .

$$\sum_{v=1}^V y_v^{\theta} = 1, v = \overline{1, V} \quad (10)$$

по размещению массивов киберфизической системы на различных носителях

$$\sum_{\mu=1}^{\mu_0} \sum_{\theta=1}^{\theta_0} y_{s\mu}^{\theta} = 1, s = \overline{1, S}, \quad (11)$$

при использовании носителей, имеющих определенный тип, когда размещаются модули и массивы внутри киберфизических систем

$$\sum_{v=1}^V y_v^{\theta} = 0, \text{ если задано } \theta, \quad (12)$$

$$\sum_{s=1}^S \sum_{\mu=1}^{\mu_0} x_{s\mu}^{\theta} = 0, \text{ для заданного } \theta. \quad (13)$$

С точки зрения практического использования могут быть проанализированы задачи, в которых: 1) реализуется выбор по оптимальным способам, связанным с тем, как организируются массивы и модули, которые есть во внешней памяти; 2) реализуется выбор по оптимальным способам, в которых время обработки данных будет минимизироваться.

Если рассматривается первый случай, то критерий представляется формулой [12, 13] таким образом:

$$\min_{\{x_{s\mu}^{\theta}, y_v^{\theta}\}} \sum_{\theta=1}^{\theta_0} \sum_{v=1}^V Q_v [\tau_v^{\theta} y_v^{\theta} + \sum_{s=1}^S \sum_{\mu=1}^{\mu_0} (m_{vs}^m t_{s\mu}^{\theta(m)} + m_{vs}^a t_{s\mu}^{\theta(a)})], \quad (14)$$

для второго случая

$$\min_{\{x_{s\mu}^{\theta}, y_v^{\theta}\}} \sum_{v=1}^V n_{iv} P_i g_v^i [\tau_v^{\theta} y_v^{\theta} + \sum_{s=1}^S \sum_{\mu=1}^{\mu_0} (m_{vs}^m t_{s\mu}^{\theta(m)} + m_{vs}^a t_{s\mu}^{\theta(a)})]. \quad (15)$$

В представленных задачах, помимо ограничений, представленных формулами (7)–(13), необходимо учесть дополнительное ограничение, связанное с общими затратами H по формированию и функционированию системы обмена данными:

$$\sum_{\theta=1}^{\theta_0} S_{\theta} [(\sum_{v=1}^V d_v y_v^{\theta} + \sum_{s=1}^S \sum_{\mu=1}^{\mu_0} R_s x_{s\mu}^{\theta}) + d_{\theta}^{-1}] + \sum_{\theta=1}^{\theta_0} C_{\theta} \{ \sum_{v=1}^V Q_v [(\tau_v^{\theta} y_v^{\theta} + \sum_{s=1}^S \sum_{\mu=1}^{\mu_0} (m_{vs}^m t_{s\mu}^{\theta(m)} + m_{vs}^a t_{s\mu}^{\theta(a)}))] \} \leq H.$$

Формулы (6), (14) и (15) отражают задачи линейного программирования с булевыми переменными.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В ходе моделирования по представленной методике было рассмотрено 15 модулей и 20 информационных массивов в киберфизической системе. Разработана имитационная модель, на основе которой проводились исследования. Реализация имитационной модели была в среде C++. В качестве дополнительного условия предлагается учитывать, что информационные массивы не дублируются.

Используемый алгоритм рассматривался как сформированный на основе двух частей. Первая из них связана с тем, что реализуется процесс сортировки по множеству модулей (n) и информационных массивов (m). При этом установлено, что требуется для того, чтобы были осуществлены вычисления, $O(n(m + \log(n)))$ времени.

Во второй части алгоритма происходила реализация методики оптимизации. Число операций, которые были необходимы, не превышает k . Эксперименты показали, что итоговое время работы рассмотренного алгоритма составляет $O(n(k+m + \log()))$. Если ведется определение по целочисленному решению, то важно по каждому из нецелочисленных параметров сделать разделение решения относительно 2 ветвей: по первой ветви рассматривается $x = 0$; по второй ветви считается, что $x \geq 1$, и требуется, чтобы был осуществлен процесс пересчета по нижней границе решения. После этого был осуществлен выбор по решению, которое соответствует наименьшей границе. Целочисленное решение определялось при осуществлении итерационного пересчета по параметрам.

Полученный состав информационных массивов дает возможности для того, чтобы осуществить сокращение обращений модулей информационной системы к синтезированной системе массивов на 35% по сравнению с произвольным их размещением.

ВЫВОДЫ

Представленный в работе подход является достаточно общим. Он может использоваться для широкого класса киберфизических систем, которые могут являться распределенными. В дальнейшем подход может быть обобщен для киберфизических систем, имеющих переменную структуру.

REFERENCES

1. Len Bass, Ingo Weber, Liming Zhu. *DevOps A Software Architect's Perspective*. NJ: Addison-Wesley Professional, 2015.
2. Richard W. Selby. *Software Engineering: Barry W. Boehm's Lifetime Contributions to Software Development, Management, and Research*. John Wiley & Sons. 2007. 834 p.
3. Ингланд Р. Овладевая ITIL. М.: Лайвбук, 2011. 200 с.
England R. *Ovladevaya ITIL* [Mastering ITIL]. М.: Live Book, 2011. 200 p. (In Russian)
4. The Open Group architecture framework. URL: <http://www.opengroup.org/togaf>.
5. Babar M.A., Brown A.W., Mistrik I. *Agile software architecture aligning agile processes and software architectures*. MA, USA: Morgan Kaufmann, 2014.
6. Мещеряков Р. В., Исхаков А. Ю., Евсютин О. О. Современные методы обеспечения целостности данных в протоколах управления киберфизических систем. *Тр. СПИИРАН*, 2020. Вып. 19. Т. 5. С. 1089–1122. DOI: <https://doi.org/10.15622/ia.2020.19.5.71>
7. Meshcheryakov R.V., Iskhakov A.Y., Evsyutin O.O. Modern methods of ensuring data integrity in control protocols of cyberphysical systems. *Tr. SPIIRAN*, 2020. No. 19. Vol. 5. Pp. 1089–1122. DOI: <https://doi.org/10.15622/ia.2020.19.5.71>. (In Russian)
7. Lvovich I., Lvovich Y., Preobrazhenskiy A. Modeling the processes of increasing the efficiency of the internet of things system. In the collection: *Proceedings – 2022, International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing. ICIEAM 2022*. Pp. 1030–1034.
8. Lvovich I., Lvovich Y., Preobrazhenskiy A. Modeling the classification of internet of things objects by failures. In the collection: *Proceedings – 2022, International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2022*. Pp. 1035–1039.
9. Lvovich I.Y., Preobrazhenskiy A.P., Lvovich Y.E., Choporov O.N. Algorithmization of control of information and telecommunication systems based on the optimization model.

Procedia Computer Science. Ser. "14th International Symposium "Intelligent Systems", INTELS 2020. 2021. Pp. 563–570.

10. Lvovich I.Ya., Preobrazhenskiy A.P., Preobrazhenskiy Y.P. et al. The investigation of the characteristics of conflicts in industrial organizations based on modeling. *IFAC-PapersOnLine.* 2021. Pp. 477–481.

11. Lvovich I., Preobrazhenskiy A., Lvovich Y., Choporov O. Optimization of internet of things system. *Communications in Computer and Information Science.* 2021. Vol. 1448. Pp. 135–148.

12. Lvovich I.Ya., Lvovich Ya.E., Preobrazhenskiy A.P. et al. Models for evaluating the performance of complex information and communication systems. *Journal of Physics: Conference Series.* Krasnoyarsk, Russian Federation, 2020. P. 22099.

13. Sanfelice R.G. et al. Analysis and design of cyber-physical systems. A hybrid control systems approach. *Cyber-physical systems: From theory to practice.* Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2016. Pp. 1–29.

Информация об авторах

Аветисян Татьяна Владимировна, преподаватель, Колледж Воронежский институт высоких технологий;

394043, Россия, г. Воронеж, ул. Ленина, 73а;

vtatyana_avetisyan@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3559-6070>

Львович Яков Евсеевич, д-р техн. наук, профессор, Воронежский институт высоких технологий;

394043, Россия, г. Воронеж, ул. Ленина, 73а;

office@vivt.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7051-3763>

Преображенский Андрей Петрович, д-р техн. наук, профессор, Воронежский институт высоких технологий;

394043, Россия, г. Воронеж, ул. Ленина, 73а;

app@vivt.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6911-8053>

Преображенский Юрий Петрович, канд. техн. наук, доцент, проректор по ИТ, Воронежский институт высоких технологий;

394043, Россия, г. Воронеж, ул. Ленина, 73а;

office@vivt.ru

Information about the authors

Avetisyan Tatiana Vladimirovna, Lecturer, College of the Voronezh Institute of High Technologies; 394043, Russia, Voronezh, 73a Lenina street;

vtatyana_avetisyan@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3559-6070>

Lvovich Yakov Evseyevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Voronezh Institute of High Technologies;

394043, Russia, Voronezh, 73a Lenina street;

office@vivt.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7051-3763>

Preobrazhensky Andrei Petrovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Voronezh Institute of High Technologies;

394043, Russia, Voronezh, 73a Lenina street;

app@vivt.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6911-8053>

Preobrazhensky Yuri Petrovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Vice-Rector for IT, Voronezh Institute of High Technologies;

394043, Russia, Voronezh, 73a Lenina street;

office@vivt.ru