

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ В КИБЕРФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

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

Воронежский институт высоких технологий, Воронеж, Россия
**app@vivt.ru*

Аннотация. Рассматриваются особенности решения задач, связанных с оптимизацией процессов передачи информации в киберфизических системах на производственных предприятиях. Представлен многоэтапный процесс принятия оптимального решения по формированию киберфизической системы, использование которой позволяет преодолеть трудности, связанные с большими размерностями анализируемой задачи. Продемонстрировано, какие условия накладываются на управляемые параметры. Представлена совокупность ограничений в системе. Приведена структурная схема процесса принятия оптимального решения, сводящегося к определенной процедуре. Показан принцип построения обобщенного критерия эффективности. Приведена совокупность экстремальных задач, используемых в ходе анализа киберфизической системы. Показано, как реализуется принцип оптимальности на основе системы функциональных уравнений, представленных в виде рекуррентных соотношений. Рассмотрены особенности распределения затрат по ресурсам в киберфизической системе и приведен пример рационального использования модульных мощностей в общей структуре системы. Представлены результаты математического моделирования, демонстрирующие возможность повышения эффективности процесса передачи данных.

Ключевые слова: киберфизическая система, процесс, оптимальность, оптимизация, моделирование

Ссылка для цитирования: Аветисян Т. В., Львович Я. Е., Преображенский А. П. Оптимизация процессов в киберфизических системах // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 5. С. 389—398. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-5-389-398.

OPTIMIZATION OF PROCESSES IN CYBER-PHYSICAL SYSTEMS

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

Voronezh Institute of High Technologies, Voronezh, Russia
**app@vivt.ru*

Abstract. The features of solving problems related to the optimization of information transfer processes in cyber-physical systems at manufacturing enterprises are considered. A multi-stage process of making an optimal decision on the formation of a cyber-physical system is presented, the use of which makes it possible to overcome the difficulties associated with the large dimensions of the analyzed problem. Conditions imposed on the controlled parameters are revealed. A set of restrictions in the system is presented. A block diagram of the process of making an optimal decision reduced to a certain procedure, is given. A principle of constructing a generalized efficiency criterion is shown. A set of extremal problems used in the course of a cyber-physical system analysis is formulated. On the basis of a system of functional equations presented in the form of recurrent relations, realization of the optimality principle is demonstrated. The features of costs distribution by resources in a cyber-physical system are considered and an example of the rational use of modular capacities in the overall structure of the system is given. The results of mathematical modeling are presented to demonstrate the possibility to increase the efficiency of the data transmission process.

Keywords: cyber-physical system, process, optimality, optimization, modeling

For citation: Avetisyan T. V., Lvovich Ya. E., Preobrazhensky A. P. Optimization of processes in cyber-physical systems. *Journal of Instrument Engineering*. 2023. Vol. 66, N 5. P. 389—398 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-5-389-398.

Введение. В настоящее время в производственной сфере наблюдается активное внедрение и развитие элементов киберфизических систем. В таких системах происходит процесс циркуляции больших объемов данных, имеющих разные приоритеты. Этим обуславливается

необходимость решения задач по оптимизации ресурсов, используемых при формировании киберфизических систем на основе модульных структур [1, 2].

При проектировании киберфизических систем многие разработчики опираются на интеграционные подходы. Например, парадигма проектирования Девопс базируется на требованиях об уменьшении разрыва между разработкой системы и ее непрерывной модернизацией в жизненном цикле. На практике от водопадных моделей процессов разработчики систем переходят к циклическим и спиральным моделям. Другой возможный подход, позволяющий минимизировать разрыв между этапами жизненного цикла киберфизической системы, — использование методологии ITIL (Information Technology Infrastructure Library — библиотека инфраструктуры информационных технологий) [3]. Сейчас также наблюдается развитие подходов, которые базируются на использовании свойств вариабельности (agility) киберфизических систем [4], при этом необходимо обеспечивать целостность данных в протоколах управления системами. Представляет интерес разработка модели, позволяющей учесть многошаговость процесса внутри киберфизических систем в рамках методов динамического программирования.

Цель настоящей статьи — разработка комбинированного алгоритма, позволяющего принимать оптимальные решения по формированию киберфизических систем на производственных предприятиях.

Многошаговый процесс принятия оптимального решения при формировании киберфизической системы [5]. Используется подход, который базируется на задаче нелинейного программирования, если рассматривать математическую модель, позволяющую принимать оптимальное решение в общем виде

$$\min_{x \in D} Q(x), \quad (1)$$

где $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ — вектор управляемых переменных, описывающий модули, которые формируют киберфизическую систему; D — область допустимых решений.

Размерность в оптимизационной задаче (1) в ходе реализации численного решения будет оказывать значительное влияние на характеристики эффективности. По оптимизируемым переменным x , когда принимается оптимальное решение, выбор численных значений, соответствующих всем n компонентам, осуществляется одновременно. Это может привести к тому, что поиск оптимального решения x^* при большой размерности в задаче (1) будет затруднен. Для преодоления указанной трудности предлагается процесс принятия решения рассматривать как N -шаговый. Тогда принятие оптимального решения будет реализовано многошаговым образом (ПОРМ). Осуществляется разбиение процесса на N частей, $q_k = (x_{j_1}, x_{j_m}) \in D, k = \overline{1, N}$, не связанных между собой и выделяемых в векторе оптимизируемых переменных $x = (x_1, \dots, x_n)$. В результате формируется вектор управляемых параметров. Для выбора каждой из этих частей используется соответствующий шаг ПОРМ. При этом важно выполнение двух условий, которые связаны с управляемыми параметрами:

1) формируется исходный вектор x на основе всех векторов $q_k, k = \overline{1, N}$, соединяющих соответствующие компоненты x_j :

$$\bigcup_{k=1}^N q_k = (x_1, \dots, x_n);$$

2) любая составляющая x_j , относящаяся к исходному вектору x , может быть связана лишь с одним из векторов q_k :

$$q_k \cap q_i = \emptyset, k, i = \overline{1, N}, k \neq i.$$

Анализ показывает, что реализация ПОРМ рассматривается как оптимизационный подход для задачи (1). При этом используются векторы q_k , $k = \overline{1, N}$, а не один вектор, которые характеризуются меньшей размерностью, если проводить сравнение с первичным вектором переменных x .

Введем в ПОРМ обозначение индекса „1“, который связан с N -м шагом; он показывает конечное состояние. Нумерацию осуществим справа налево по шагам. Будем использовать обратную систему индексов для того, чтобы показать развертывание во времени многошагового процесса принятия решения. В ходе моделирования при первом шаге происходит выбор вектора управляемых параметров q_1 . Далее выполняется шаг $N - 1$, который связан с вектором q_{N-1} . Процедура повторяется до шага „1“, являющегося последним и соответствующего вектору N . Это иллюстрируется рис. 1.

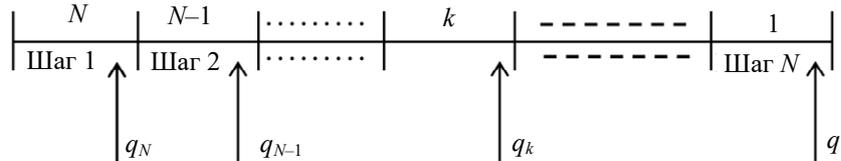


Рис. 1

В представленной схеме можно выделить k -й шаг относительно конца ПОРМ.

Используем векторы состояний p_{k+1} и p_k для рассмотрения вектора q_k , который будет соответствовать управляемым параметрам, а также осуществлять их выбор относительно k -го шага. В ходе рассмотрения полагаем, что по каждому из шагов число переменных состояния одинаково и равно m . В этом случае можно выделить вектор переменных, который соответствует вектору начального состояния до того, как будет принято решение, соответствующее k -му шагу:

$$p_{k+1} = (p_{k+1,1}, p_{k+1,2}, \dots, p_{k+1,m}).$$

После принятия решения приходим к вектору конечного состояния:

$$p_k = (p_{k1}, p_{k2}, \dots, p_{km}).$$

Вектор состояния до того, как будет реализован k -й шаг, соответствует p_{k+1} . В этом случае следующий вектор переменных соответствует начальному состоянию

$$p_{N+1} = (p_{N+1,1}, p_{N+1,2}, \dots, p_{N+1,m}),$$

в свою очередь, такой вектор переменных связан с конечным состоянием

$$p_1 = (p_{1,1}, p_{1,2}, \dots, p_{1,m}).$$

Предположим, что задано правило, позволяющее осуществлять процесс преобразования от начального состояния p_{k+1} к конечному p_k при заданном векторе управляемых параметров q_k на k -м шаге:

$$p_k = F_k(p_{k+1}, q_k).$$

Основываясь на ограничениях вида равенств или неравенств, связь между p_k , $k = \overline{1, N + 1}$, и q_k , $k = \overline{1, N}$, можно в общем виде представить следующим образом:

$$\begin{aligned} g_j(p_1, \dots, p_{N+1}, q_1, \dots, q_N) &= 0, j = \overline{1, M}; \\ f_i(p_1, \dots, p_{N+1}, q_1, \dots, q_N) &\geq 0, i = \overline{1, L}. \end{aligned} \tag{2}$$

Система ограничений (2) образует множество D_q . Считается, что в случае удовлетворения указанной системе вектор управляемых параметров q_k будет рассматриваться как допустимый. Предположим, что анализируется множество векторов (q_1, \dots, q_N) и для каждого из них формируется допустимый вектор управляемых параметров:

$$q_k \in D_q, \quad k = \overline{1, N}.$$

Тогда стратегия q рассматривается как допустимая. Конечное состояние p_{k+1} может быть зафиксировано. Для сравнения разных допустимых векторов по управляемым параметрам q_k может быть использован показатель эффективности по k -му шагу $R_k(p_{k+1}, q_k)$. Процесс принятия оптимального решения сводится к некоторой процедуре (рис. 2). Начальное состояние соответствует k шагам с индексами $(k, k-1, \dots, 2, 1)$. В этом случае говорят о k -шаговом конфинальном подпроцессе, который будет соответствовать любому из векторов переменных состояний p_{k+1} . Такой процесс показывает, каким образом вектор управляемых параметров q_k будет оказывать влияние на дальнейшие состояния $(p_k, p_{k-1}, \dots, p_1)$. При этом важен выбор текущего состояния p_{k+1} , тогда как предыдущие состояния $p_{N+1}, p_N, \dots, p_{k+2}$ не будут оказывать влияние.

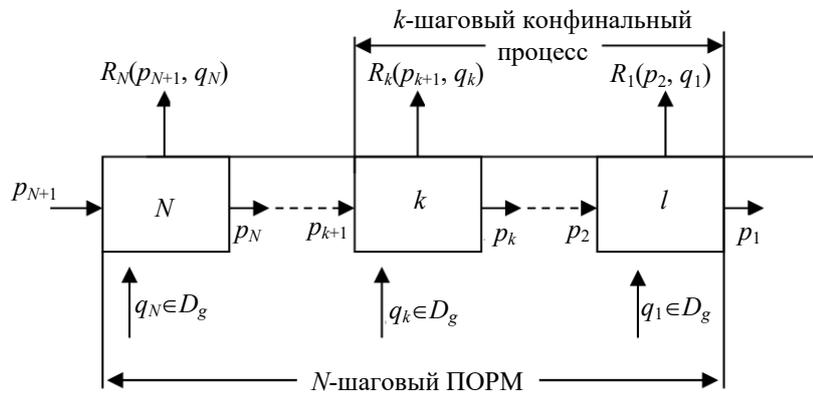


Рис. 2

При проведении моделирования необходимо использовать общую шкалу измерения или приводить к безразмерному виду показатели эффективности по любому из шагов $R_k(p_{k+1}, q_k), k = \overline{1, N}$. Используя свойство аддитивности, можно за счет суммирования показателей прийти к обобщенному критерию эффективности

$$R(q_1, \dots, q_N, p_{k+1}) = \sum_{k=1}^N R_k(p_{N+1}, q_k),$$

который соответствует многошаговому процессу в целом. В этом случае следует опираться на задачу оптимизации, когда рассматриваются процессы принятия решения:

$$f_N(p_{N+1})R(q_1^*, \dots, q_N^*, p_{N+1}) = \min_{(q_1, \dots, q_N) \in D_q} \left\{ \sum_{k=1}^N R_k(p_{k+1}, q_k) \right\}. \quad (3)$$

Если рассматривается многошаговый процесс ПОРМ, то функция $f_N(p_{N+1})$ определяет, каким будет минимальное значение обобщенного критерия эффективности. Вектор переменных p_{N+1} будет оказывать влияние на характеристики начального состояния. В качестве оптимальной допустимой стратегии анализируется (q_1^*, \dots, q_N^*) , за счет которой и приходим к значениям $f_N(p_{N+1})R(q_1^*, \dots, q_N^*, p_{N+1})$.

Использование принципа оптимальности при моделировании [6]. Для реализации общего подхода к моделированию киберфизической системы и для ее оптимизации можно использовать выражение (3). Пусть рассматривается целое число шагов k ($0 \leq k \leq N$). Предположим, что начальным состоянием будет p_{k+1} . Используя неотрицательный параметр p ($0 \leq p \leq p_0$), можно сформировать множество экстремальных задач:

Реализация метода динамического программирования осуществляется на основе множества представленных функциональных уравнений (8). Размерность задачи за счет использования такого метода будет понижена. Тогда каждый из шагов будет связан с одномерной задачей оптимизации. При этом необходимо предусмотреть дополнительный объем памяти, поскольку в него будут заноситься значения $f_k(p)$, соответствующие диапазону $p \in [0, P_0]$, в котором будут выбираться дискретные значения. Это связано с отсутствием информации о том, какое значение p принимается в качестве наилучшего на k -м шаге. Когда рассматривается N -й шаг, ему соответствует значение p , являющееся наилучшим и равное $p_{N+1} = p_0$.

Здесь можно говорить о реализации принципа оптимальности в рамках сформированной системы функциональных уравнений (8). Поясним его основную идею.

Чтобы осуществить распределение ресурса p_{k+1} , неважно, каким образом формируется выражение $(x_N, \dots, x_{k+1}) \in D_q$, т.е., можно опираться на стратегию $(x_N^*, \dots, x_{k+1}^*)$, которая будет оптимальной. Также возможно опираться на некоторую стратегию (x_k, \dots, x_1) , которая связана с оставшимися k шагами в финальном подпроцессе. Важно, чтобы по показателю эффективности $R_k(x_k)$, соотнесенному с k -м шагом, было обеспечено минимальное значение. Кроме того, требуется, чтобы по $f_{k-1}(p_k)$ — обобщенному показателю в $(k-1)$ -шаговом финальном подпроцессе — было обеспечено минимальное значение.

Если будет допущена ошибка по управляемому параметру x_k^* , то возможностей для ее исправления на дальнейших шагах, соответствующих индексам „ $k-1$ “, „ $k-2$ “, ..., „ 1 “, не будет, т.е. необходимо учитывать последствия совершенного неправильного выбора.

Оптимизация состава киберфизической системы [8]. Пусть при фиксированном промежутке времени имеется информация относительно программы работы киберфизической системы по выделенному технологическому участку. Данная программа может в течение времени существенным образом меняться (рис. 3).

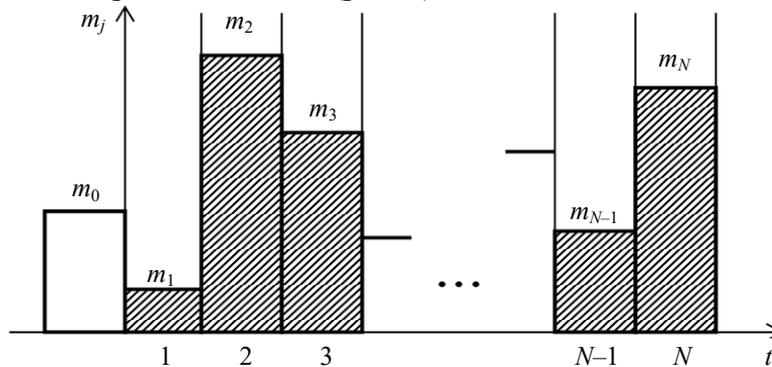


Рис. 3

Пусть для j -го периода времени относительно объемов данных, которые требуется передавать, имеется плановое задание $m_j, j = \overline{1, N}$. Также для этого периода времени реальное по объемам данных значение равно $q_j = x_j, j = \overline{1, N}$.

Необходимо учитывать возникающие в этом случае затраты производственных ресурсов, в частности объем передаваемых данных, мощности оборудования, обслуживающий персонал. Исходим из того, что выполняется плановое задание m_j :

$$x_j \geq m_j, j = \overline{1, N}.$$

Объем передаваемых данных $x_{N+1} = x_0$ показывает те затраты, которые в ходе планирования будут переноситься с предыдущих периодов. Предположим, что возникает ситуация, в

которой отсутствуют затраты на используемую мощность киберфизической системы. Тогда плановые задания и оптимальный график, связанный с передачей данных, совпадают:

$$x_j^* \geq m_j^*, j = \overline{1, N}.$$

Возможна ситуация, когда в киберфизической системе соответствующий передаче данных график невыгодно применять, если анализировать все затраты: например, в случаях, когда в каждом периоде времени будут большие затраты, связанные как с ростом, так и с уменьшением производственных мощностей [9].

Затраты, относящиеся к хранению данных, должны быть учтены при передаче данных, объем которых превышает плановое задание $(x_j - m_j)$. Отличие планового задания от фактического можно представить на основе функции затрат

$$g_j(x_j - m_j) = \begin{cases} 0, & \text{если } x_j = m_j; \\ b_j(x_j - m_j)^2, & \text{если } x_j > m_j, \end{cases} \quad (9)$$

учитывая, что $b_j > 0, j = \overline{1, N}$, — стоимость хранения единицы объема данных.

Затраты, связанные с изменением мощности киберфизической системы, должны быть учтены вместе с затратами, которые относятся к хранению данных (9). Если при планировании осуществлять переход от $(j + 1)$ -го периода к j -му, то будет выполняться соотношение $x_j \neq x_{j+1}$. При введении новых мощностей необходимо оценить, какие потребуются затраты, связанные с дополнительными средствами. Для этого предлагается применять функцию издержек сглаживания:

$$\varphi_j(x_j - x_{j+1}) = \begin{cases} 0, & \text{если } x_j = x_{j+1} \text{ (мощности киберфизической системы} \\ & \text{не меняются);} \\ 0, & \text{если } x_j < x_{j+1} \text{ (затраты на уменьшение мощностей} \\ & \text{киберфизической системы равны нулю);} \\ a_j(x_j - x_{j+1})^2, & \text{если } x_j > x_{j+1} \text{ (затраты, связанные с увеличением} \\ & \text{мощностей киберфизической системы),} \end{cases}$$

здесь $a_j > 0, j = \overline{1, N}$, — стоимость, связанная с вводом единицы новой производственной мощности.

Общие затраты, которые связаны с процессом передачи данных, необходимо минимизировать. Для этого решение следует принимать по объемам передаваемых данных и данных, которые будут передаваться в соответствующие периоды планирования $x_j^*, j = \overline{1, N}$. Математическую модель представим следующим образом [10—11]:

$$F_N(x_0) = \min_{\substack{(x_1, \dots, x_N) \\ x_j \geq m_j, j = \overline{1, N}}} \left\{ \sum_{i=1}^N q_i (q_j(x_j - m_j) + \varphi_j(x_j - x_{j+1})) \right\} =$$

$$= \max_{\substack{(x_1, \dots, x_N) \\ x_j \geq m_j, j = \overline{1, N}}} \left\{ \sum_{i=1}^N q_i (q_j(x_j - x_{j+1})^2 + B_j(x_j - m_j)^2) \right\},$$

$x_j = 0, 1, 2 \dots$ — целые числа.

Можно рассматривать одномерные задачи оптимизации, если анализируется обозначенная задача:

$$f_1(p_2) = \min_{x_1 \geq m_2} \left\{ a_1(x_1 - p_2)^2 + B_j(x_1 - m_1)^2 \right\}, \quad (10)$$

где x_1 — целое число;

$$f_k(p_k + 1) = \min_{x_k \geq m_k} \left\{ a_k(x_k - p_{k+1})^2 + B_k(x_k - m_k)^2 \right\} + f_{k-1}(p_k), \quad k = \overline{2, N}. \quad (11)$$

Предположим, что плановое задание, связанное с передачей данных, отсутствует. Тогда выполняется условие $m_j = 0, j = \overline{1, N}$. Для решения системы функциональных уравнений (10), (11) необходимо опираться на следующие шаги [12, 13].

Шаг 1. Вводится параметр

$$w_1 = a_1 b_1 / (a_1 + b_1).$$

Шаг 2. Вычисляется множество параметров с использованием рекуррентного подхода:

$$w_k = (a_k b_k + a_k w_{k-1}) / (a_1 + b_1 + w_{k-1}), \quad k = \overline{2, N}.$$

Шаг 3. Вычисляются полные издержки в производственном процессе с точки зрения достижения ими минимального значения:

$$f_N(x_0) = f_N(p_{N+1}) = w_N x_0^2.$$

Шаг 4. По N -му планируемому периоду определяются значения, связанные с фактическим изменением характеристик объектов в системе:

$$x_N^* = \frac{a_N p_{N+1}}{a_N + b_N + w_{N-1}}.$$

Шаг 5. Для каждого из планируемых периодов вычисляются значения, характеризующие фактический объем передаваемых данных; используется рекуррентное выражение

$$x_k^* = \frac{a_k x_{k+1}^*}{a_k + b_k + w_{k-1}}, \quad k = \overline{N-1, 2}.$$

Шаг 6. Для шага 1 определяется объем передаваемых данных:

$$x_1^* = \frac{a_1 x_2^*}{a_1 + b_1}.$$

Таким образом, приходим к оптимальному плану передачи данных в киберфизической системе (x_1^*, \dots, x_N^*) за счет решения последовательности одномерных задач оптимизации (10), (11). Компоненты оптимального плана незначительно отличаются от плановых заданий (m_1, \dots, m_N) . Кроме того, имеется небольшое отличие с точки зрения того, какими будут полные затраты, обусловленные организацией процесса передачи данных внутри киберфизической системы [14].

Заключение. Рассмотрены особенности оптимизации киберфизической системы на производственных предприятиях. Можно отметить ключевые результаты работы: многоэтапный процесс принятия оптимального решения при создании киберфизической системы, принцип оптимальности, задачи одномерной оптимизации, иллюстрация рационального применения ресурсов и модулей системы. Результаты математического моделирования позволяют обеспечить повышение эффективности киберфизической системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lvovich I., Lvovich Y., Preobrazhenskiy A. Modeling the processes of increasing the efficiency of the internet of things system // Proc. Intern. Conf. on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM 2022). 2022. P. 1030—1034.

2. Lvovich I., Lvovich Y., Preobrazhenskiy A. Modeling the classification of internet of things objects by failures // Proc. Intern. Conf. on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM 2022). 2022. P. 1035—1039.
3. Ингланд Р. Овладевая ITIL. М.: Лайвбук, 2011. 200 с.
4. Muhammad Ali Babar, Brown A. W., Mistrík I. Agile software architecture aligning agile processes and software architectures. MA, USA: Morgan Kaufmann, 2014.
5. Lvovich I. Ya., Preobrazhenskiy A. P., Preobrazhenskiy Yu. P., Lvovich Ya. E. Modeling and optimization internet of things systems in companies // Proc. SPIE. Computer Applications for Management and Sustainable Development of Production and Industry (CMSD 2021). 2022. P. 122510D.
6. Lvovich I. Ya., Preobrazhenskiy A. P., Preobrazhenskiy Yu. P., Lvovich Ya. E. Modeling and optimization of resources in information systems // Proc. SPIE. Computer Applications for Management and Sustainable Development of Production and Industry (CMSD 2021). 2022. P. 122510E.
7. 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: 14th Intern. Symp. „Intelligent Systems“ (INTELS 2020). 2021. P. 563—570.
8. Modelling and optimizing sensor wireless network systems / I. Ya. Lvovich, Ya. E. Lvovich, A. P. Preobrazhenskiy, Yu. P. Preobrazhenskiy, O. N. Choporov // Journal of Physics: Conf. Series. II Intern. Scientific Conf. on Metrological Support of Innovative Technologies (ICMSIT II-2021). Krasnoyarsk, 2021. P. 22080.
9. Мещеряков Р. В., Исхаков А. Ю., Евсютин О. О. Современные методы обеспечения целостности данных в протоколах управления киберфизических систем // Тр. СПИИРАН. 2020. Т. 5, вып. 19. С. 1089—1122.
10. The investigation of the characteristics of conflicts in industrial organizations based on modeling / I. Ya. Lvovich, A. P. Preobrazhenskiy, Y. P. Preobrazhenskiy, Y. E. Lvovich, O. N. Choporov // IFAC-PapersOnLine. 2021. N 20. P. 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. P. 135—148.
12. Models for evaluating the performance of complex information and communication systems / I. Ya. Lvovich, Ya. E. Lvovich, A. P. Preobrazhenskiy, Yu. P. Preobrazhenskiy, O. N. Choporov // Journal of Physics: Conf. Series. Krasnoyarsk, 2020. P. 22099.
13. Preobrazhenskiy Yu. P., Azer K. M. V., Dzhumageldiev D. Some characteristics of computer networks // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2022. № 1 (40). С. 86—88.
14. Львович Я. Е., Преображенский Ю. П., Ружицкий Е. Особенности оптимизации беспроводных систем связи // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2022. № 1 (40). С. 68—71.

Сведения об авторах

- Татьяна Владимировна Аветисян** — Воронежский институт высоких технологий, кафедра информационных систем и технологий; ст. преподаватель;
E-mail: vtatyana_avetisyan@mail.ru
- Яков Евсеевич Львович** — д-р техн. наук, профессор; Воронежский институт высоких технологий, кафедра информационных систем и технологий;
E-mail: office@vivt.ru
- Андрей Петрович Преображенский** — д-р техн. наук, профессор; Воронежский институт высоких технологий, кафедра информационных систем и технологий;
E-mail: app@vivt.ru

Поступила в редакцию 09.12.2022; одобрена после рецензирования 29.12.2022; принята к публикации 20.03.2023.

REFERENCES

1. Lvovich I., Lvovich Y., Preobrazhenskiy A. *Proceedings-2022 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2022*, 2022, pp. 1030—1034.
2. Lvovich I., Lvovich Y., Preobrazhenskiy A. *Proceedings-2022 International Conference on Industrial Engineering,*

- Applications and Manufacturing, ICIEAM 2022, 2022, pp. 1035–1039.*
3. England R. *Owning ITIL*, Two Hills, 2009.
 4. Babar M.A., Brown A.W., Mistrik I. *Agile Software Architecture Aligning Agile Processes and Software Architectures*, MA, USA, Morgan Kaufmann, 2014.
 5. Lvovich I.Ya., Preobrazhenskiy A.P., Preobrazhenskiy Yu.P., Lvovich Ya.E. *Proceedings of the International Society for Optical Engineering. Computer Applications for Management and Sustainable Development of Production and Industry, CMSD 2021, 2022, pp. 122510D.*
 6. Lvovich I.Ya., Preobrazhenskiy A.P., Preobrazhenskiy Yu.P., Lvovich Ya.E. *Proceedings of the International Society for Optical Engineering. Computer Applications for Management and Sustainable Development of Production and Industry, CMSD 2021, 2022, pp. 122510E.*
 7. Lvovich I.Y., Preobrazhenskiy A.P., Lvovich Y.E., Choporov O.N. *Procedia Computer Science. 14th International Symposium "Intelligent Systems", INTELS 2020, 2021, pp. 563–570.*
 8. Lvovich I.Ya., Lvovich Ya.E., Preobrazhenskiy A.P., Preobrazhenskiy Yu.P., Choporov O.N. *Journal of Physics: Conference Series. II International Scientific Conference on Metrological Support of Innovative Technologies (ICMSIT II-2021)*, Krasnoyarsk, 2021, pp. 22080.
 9. Meshcheryakov R., Iskhakov A., Evsutin O. *Trudy SPIIRAN (SPIIRAS Proceedings)*, 2020, no. 5(19), pp. 1089–1122. (in Russ.)
 10. Lvovich I.Ya., Preobrazhenskiy A.P., Preobrazhenskiy Y.P., Lvovich Y.E., Choporov O.N. *20th IFAC-PapersOnLine*, 2021, pp. 477–481.
 11. Lvovich I., Preobrazhenskiy A., Lvovich Y., Choporov O. *Communications in Computer and Information Science*, 2021, vol. 1448, pp. 135–148.
 12. Lvovich I.Ya., Lvovich Ya.E., Preobrazhenskiy A.P., Preobrazhenskiy Yu.P., Choporov O.N. *Journal of Physics: Conference Series*, Krasnoyarsk, Russian Federation, 2020, pp. 22099.
 13. Preobrazhenskiy Yu.P., Azer K.M.V., Dzhumageldiev D. *Bulletin of the Voronezh Institute of High Technologies*, 2022, no. 1(40), pp. 86–88. (in Russ.)
 14. Lvovich Ya.E., Preobrazhenskiy Yu.P., Ruzhitskiy E. *Bulletin of the Voronezh Institute of High Technologies*, 2022, no. 1(40), pp. 68–71. (in Russ.)

Data on authors

- | | |
|----------------------------------|---|
| Tatiana V. Avetisyan | — Voronezh Institute of High Technologies, Department of Information Systems and Technologies; Senior Lecturer;
E-mail: vtatyana_avetisyan@mail.ru |
| Yakov E. Lvovich | — Dr. Sci., Professor; Voronezh Institute of High Technologies, Department of Information Systems and Technologies; E-mail: office@vivot.ru |
| Andrey P. Preobrazhenskiy | — Dr. Sci., Professor; Voronezh Institute of High Technologies, Department of Information Systems and Technologies; E-mail: app@vivot.ru |

Received 09.12.2022; approved after reviewing 29.12.2022; accepted for publication 20.03.2023.