

УДК 656.073

Метод решения задачи безопасного движения транспорта и пешеходов на основе квантовых и нейροкомпьютерных систем

- Савельев Максим Феликсович** — канд. техн. наук, доцент, и. о. заведующего кафедрой «Информационная безопасность». Область научных интересов: информационные системы, обработка больших данных, моделирование надежности. E-mail: mfsavelev@etu.ru
- Обухов Александр Валерьевич** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Информационная безопасность». Область научных интересов: информационные системы, обработка больших данных, распределенные вычисления. E-mail: aleks.obuhov@yandex.ru
- Малахова Наталия Сергеевна** — аспирант кафедры «Информационная безопасность». Область научных интересов: информационные системы, обработка больших данных, оптимальные системы сбора данных. E-mail: natashamalakhova95@mail.ru
- Воробьев Евгений Германович** — докт. техн. наук, доцент, профессор кафедры «Информационная безопасность». Область научных интересов: информационные системы, защита информации, моделирование атак. E-mail: vrbyug@mail.ru

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Россия, 197376, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5

Для цитирования: Савельев М. Ф., Обухов А. В., Малахова Н. С., Воробьев Е. Г. Метод решения задачи безопасного движения транспорта и пешеходов на основе квантовых и нейροкомпьютерных систем // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2024. № 4 (40). С. 43–49. DOI: 10.20295/2413-2527-2024-440-43-49

Аннотация. Рассматриваются две проблемы, возникающие в теории оптимальных процессов: 1) задача об управлении динамической системой при условии минимума выбранной оценки интенсивности $\chi [u]$ управляющих усилий; 2) задача о наблюдении, то есть задача о вычислении текущих координат $x_i(t)$ движущегося объекта по доступным измерениям функциям u_j от этих координат. Основное внимание уделено объектам, описываемым линейными уравнениями (для которых, однако, из условий минимума $\chi [u]$ выводятся нелинейные, вообще говоря, законы оптимального управления). Дано решение рассматриваемых задач, опирающееся на методы функционального анализа на основе представления задач наблюдения и принятия решения на основе замыкания управляющего контура на основе квантовых и нейροкомпьютерных технологий. Сформулированы и обоснованы правила минимакса, которые определяют оптимальные управляющие воздействия или оптимальные разрешающие операции в случаях задач об управлении и о наблюдении опасной ситуации на дороге соответственно. Обсуждена двойственность между процессами управления и наблюдения. Установлена связь рассмотренных задач с основными понятиями квантовой теории информации. Описаны численные методы определения оптимальных управляющих усилий. Рассмотрена задача об управлении в конфликтной ситуации возможного наезда беспилотного управляемого объекта на пешехода. Для решения этой задачи предложено правило экстремального оповещения пешехода, обеспечивающее минимакс времени точного реагирования человека. Изучена связь между решением задачи о наблюдении линейного объекта и каноническим разложением по собственным элементам движений динамической системы с последствием. Рассмотрена задача об успокоении возмущенных движений управляемой системы с последствием. Дано решение одной задачи о наблюдении движений линейной системы при случайных помехах.

Ключевые слова: информационные технологии, цифровые технологии, автоматизация, интеграция

1.2.1 — искусственный интеллект и машинное обучение (технические науки), **2.3.1** — системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки)

Введение

Национальная технологическая инициатива РФ на 2017–2030 годы определяет внедрение беспилотного автомобильного транспорта. В настоящее время в России и за рубежом разработаны различные виды беспилотного городского и междугороднего легкового, грузового автомобильного транспорта с бортовыми компьютерами с искусственным интеллектом, которые способны решать навигационные задачи. Тем не менее в условиях городского движения часто возникает ситуация, когда пешеход оказывается в условиях возможного наезда и в критической ситуации не может принять быстрое правильное решение. Таким образом, размыкание контура управления ситуацией возникает из-за того, что пешеход не включен в этот контур.

Квантовые вычисления и нейрокompьютерные технологии

Появление квантовой теории информации и квантовых компьютеров знаменует собой появление систем принятия решения, которые никогда не ошибаются в пределах поставленной задачи. Кроме того, разработаны двунаправленные неинвазивные нейрокompьютерные интерфейсы, способные воспринимать информацию напрямую от коры головного мозга и передавать в исполнительную компьютерную систему и наоборот.

Таким образом, появились технологии, способные решить задачу передачи информации о сути опасной ситуации и управляющем сигнале, который нейтрализует опасную ситуацию на дороге. Наибольший эффект данный подход даст при конструировании информационных систем типа «умный квартал», «умный город».

Методология

Теории оптимальных процессов посвящена серия фундаментальных монографий, вышедших в последнее время [1–4].

Как сказано выше, статья посвящена двум вопросам: задачам об управлении и наблюдении в линейных системах. При этом движение управляемой системы трактуется как результат линейной операции, которая выполняется над объектом

благодаря наложению управляющих воздействий. Этот исходный пункт, определивший все исследование, позволяет привлечь к работе аппарат линейной алгебры и функционального анализа. Таким образом, теоремы об управлении и наблюдении оказываются просто следствиями из известных общих математических фактов.

Здесь был заманчив следующий компактный способ изложения: сформулировать задачу сразу в весьма общем и абстрактном виде, а затем, указав ее интерпретацию в терминах функционального анализа, получить из его известных результатов общие теоремы, охватывающие ситуации движения беспилотных автомобилей, отдельные из которых можно было бы привести в форме примеров. В качестве такой весьма общей математической схемы, включающей в себя большое число задач об управлении и наблюдении (в том числе и задач более общего характера, чем рассматриваемые в нашей статье), можно было бы выбрать схему линейного и нелинейного программирования в абстрактных пространствах в тех аспектах, как это изложено, например, в монографии К. Дж. Эрроу, А. Гурвица и Х. Удзавы. При этом было бы естественным ограничиться лишь обсуждением интерпретации содержательных понятий теории управления в терминах данной абстрактной схемы и очертить таким путем круг задач, сводящихся к ней.

В настоящее время наиболее актуальной в проблеме управления механическим движением является задача приведения объекта в требуемое состояние [5].

Рассмотрим два раздела в общей проблеме управления:

I. Задача о программном управлении, где дана исходная информация о начальном состоянии объекта (к началу моменту $t = t_a$) и требуется найти воздействие в виде функции от времени $u = u(t)$ ($t \geq t_a$) так, чтобы в момент окончания процесса $t = t_b$ целевая система оказалась в требуемом состоянии. При этом, как отмечено выше, обычно еще требуется обеспечить желаемое качество процесса.

Примером такой задачи является проблема предельного программного быстрого действия: дано

начальное состояние $t = t_a$, $x(t_a) = x^a$ объекта и указано положение $x(t_\beta) = x^\beta$, в которое необходимо перевести объект; требуется найти воздействие $u = u^0(t)$, удовлетворяющее условию $\|u^0(t)\| \leq \mu$ и переводящее объект в состояние $x(t_\beta) = x^\beta$ за наименьшее возможное время $T = t_\beta - t_a$.

Для указанного типа задач характерно, что дополнительная информация, которая поступает, может быть, в ходе процесса, не используется для коррекции движения с целью улучшения результата, то есть движение осуществляется по жесткой программе $u = u(t)$, составленной заранее. Это ограничивает роль соответствующих результатов и вынуждает рассмотреть проблему в следующем аспекте.

II. Задача о синтезе системы с обратной связью. Здесь наилучший закон управления ищется в форме уравнений, связывающих воздействие u с некоторыми величинами $\{y_1(t), \dots, y_m(t)\}$, доставляющими информацию о текущих состояниях $x(t)$ объекта.

В частном случае, когда возможно быстрое и достаточно точное измерение всех координат $x_i(t)$ вектора $x(t)$, управляющие воздействия u_j определяются обычно в виде функций $u_j = u_j[t, x_1(t), \dots, x_n(t)]$. В нашем случае применима задача II.

Задача управления безопасным движением транспорта и пешеходов на основе квантовых и нейрокомпьютерных систем

Примером может служить задача о столкновении машины и пешехода. В этой задаче даны два объекта, описываемые уравнениями

$$x^{(1)} = f^{(1)}[x_1^{(1)}, \dots, x_k^{(1)}, u_1, \dots, u_r]$$

$$x^{(2)} = f^{(2)}[x_1^{(2)}, \dots, x_k^{(2)}, u_1, \dots, u_r]$$

и изображаемые, следовательно, в некотором k -мерном пространстве точками $x_{(1)}(t) = \{x_i^{(1)}(t)\}$, $x_{(2)}(t) = \{x_i^{(2)}(t)\}$ соответственно.

Предполагается, что первый объект пересекает маршрут движения второго объекта и результатом является совпадение точки $x_i^{(1)}(t)$ с точкой $x_i^{(2)}(t)$; при этом оба объекта стремятся избежать встречи.

Итак, выбор управляющих сил u_j и v_j диктуется желанием избежать момента встречи $t = t_\beta$. Если допустить, что в каждый момент времени t оба объекта знают реализовавшиеся значения $x_i^{(1)}(t)$ и $x_i^{(2)}(t)$, то можно поставить игровую задачу о выборе оптимальных управлений $u^0[x_i^{(1)}(t), x_i^{(2)}(t)]$ (автомобиль) и $v^0[x_i^{(1)}(t), x_i^{(2)}(t)]$ (пешеход), которые ограничены условиями $\|u\| \leq \mu$, $\|v\| \leq \nu$, вычисляются в каждый момент времени t по реализовавшимся на деле значениям $x_i^{(1)}(t)$ и $x_i^{(2)}(t)$, то есть в виде $u^0[x_i^{(1)}(t), x_i^{(2)}(t)]$, $v^0[x_i^{(1)}(t), x_i^{(2)}(t)]$, и обеспечивают минимакс для времени t_β , когда реализуется встреча объектов (наезд) $x_i^{(1)}(t) = x_i^{(2)}(t)$.

Синтез системы с обратной связью требует решения проблемы определения текущих координат $X(t)$ управляемого объекта по наблюдаемым величинам $y_j(t)$. При решении данной проблемы возникает задача мониторинга динамической системы, в ходе которого требуется оптимальное согласование управления и наблюдения с точки зрения конечных результатов процесса, что обеспечивается системами уличного видеонаблюдения и расчета траекторий движения беспилотного транспорта. Системой принятия решения (единственно правильного) должна выступать квантовая машина. Доказательство нулевой ошибки в настоящее время гарантируется билиардной моделью функционирования такой машины.

Предположим, что внешняя система определила, что неизменные траектории движения обоих объектов ведут к неминуемому столкновению. В данной ситуации проблема состоит в том, что объект-автомобиль видит дорожную ситуацию и имеет управляемый процесс изменения траектории, а объект-пешеход может даже не подозревать о неизбежности наезда (например, не видит автомобиля). Для устранения опасной ситуации необходимо своевременно подать осмысленный сигнал управления пешеходу через нейрокомпьютерный интерфейс, позволяющий с учетом времени реакции пешехода реализовать маневр уклонения (например, шаг в сторону), не допускающий реализацию $v^0[x_i^{(1)}(t), x_i^{(2)}(t)]$.

Подход к проблемам управления, отвечающий задачам синтеза оптимальных систем с обратной

связью, развивается по пути, получившему наименование метода динамического программирования [6]. Этот метод соответствует известным в вариационном исчислении рассуждениям о распространении возмущений и приводит к уравнениям типа уравнений Гамильтона – Якоби в частных производных. Теория динамического программирования охватывает многие проблемы оптимального управления как для детерминированных процессов, так и в случайных обстоятельствах, указывая целесообразные пути исследования. Следует подчеркнуть также, что методы ее применяются в форме не только необходимых, но и достаточных условий оптимальности. В последнем случае она смыкается с теорией устойчивости движения.

Одной из трудных и малоразработанных проблем остается краевая задача, связанная с необходимостью привести управляемый объект в заданное конечное состояние. В настоящее время эта краевая задача оказывается часто камнем преткновения на пути конкретного вычисления управляющих воздействий. Дело в том, что известные признаки оптимальности указывают главным образом на внутренние свойства оптимальных движений, описывая их локальное поведение в окрестности каждой точки на данной траектории. В силу этих свойств каждое оптимальное движение разворачивается во времени совершенно определенным образом. Однако направление в пространстве $\{x\}$, в котором может уходить оптимальная траектория из заданного начального состояния $x(t_a) = x^a$, определяется набором некоторых параметров l_1, \dots, l_n . Трудность заключается в таком выборе этих параметров, которые направляют траекторию в нужную точку $x(t_b) = x^b$. Указанная задача управления не имеет пока общего эффективного решения.

Таким образом, для теории управляемых систем и для ее приложений важна задача о построении управляющего воздействия u , которое приводит объект в заданное состояние. При этом целесообразно изучить данную задачу об управлении сначала даже без учета требования оптимальности по тому или иному показателю. В частности, это объясняется тем, что в ряде численных методов оптимальные движения находятся спуском от каких-либо

исходных движений, удовлетворяющих заданным краевым условиям. Итак, материал данной статьи составляет изложение некоторых функциональных подходов к проблемам управления, позволяющих для линейных систем изучить одну из главных конкретных трудностей, связанную с разрешением краевой задачи, особенно в тех случаях, когда выяснение зависимости решений от краевых условий оказывается особенно важным. Это достигается путем применения квантовых вычислений.

Решение задачи оптимального управления

Пусть управляемая система описывается линейным уравнением:

$$\dot{x} = A(t)x + B(t)u + w(t) \quad (1)$$

Заданы отрезок $t_a \leq t \leq t_b$, начальное состояние x^a и многообразие $@$ конечных состояний x^b объекта.

Выбрана интенсивность $\chi[u]$ управления $u(t)$, которая может быть истолкована как норма $p^*[u]$ функции $u(t)$ в пространстве $B\{u\}$. Требуется среди допускаемых управлений $u(t)$ найти оптимальное управление $u^0(t)$, переводящее систему (1) из состояния $x(t_a) = x^a$ в какую-нибудь точку $x(t_b) = x^b$ из заданного многообразия $@$ и имеющее при этом наименьшую возможную норму $p^*[u^0]$.

Пусть в данной задаче многообразии $@$ $\{x^b\}$ возможных конечных состояний x^b составляет гиперплоскость $x_i(t_b) = x_i^b (i = 1, \dots, m < n)$. Это означает, что краевым условиям $x_i(t_b) = x_i^b$ должны удовлетворять лишь первые m координат и что остальные координаты могут, следовательно, принимать в момент t_b любые значения. Но тогда задача сводится к определению такого управления $u^0(t)$, $v^0(t)$ и, главное, $v^0(u^0(t))$, которое удовлетворяет лишь первым m уравнениям (1) и имеет при этом минимальную интенсивность $\chi [u^0]$. Таким образом, в рассматриваемом случае получается проблема моментов для первых m функций, для решения которой следует воспользоваться уже известными правилами [7, 8].

Теорема: задача имеет решение тогда и только тогда, когда для минимальной функции $h^0(\tau)$ выполняется условие $p[h^0] = p^0 > 0$. Интенсивность оптимального управления $\chi[u^0]$ удовлетворяет

равенству $\chi[u^0] = 1/\rho^0$, и это управление обладает свойством максимума:

$$\int_{t_\alpha}^{t_\beta} h^{0'}(\tau) u^0(\tau) d\tau = \max_u \int_{t_\alpha}^{t_\beta} h^{0'}(\tau) u(\tau) d\tau$$

при $\rho^*[u] = 1/\rho^0$.

Опираясь на эту теорему, приведем правило для решения задачи I. Прежде всего, выпишем явное выражение для вектор-функций:

$$h(\tau) = \sum_{i=1}^n l_i h^{[i]}(\tau),$$

среди которых ищется минимальная функция $h^0(\tau)$. Вводя обозначение l для вектора-столбца с компонентами l_i ($i = 1, \dots, n$) и вспоминая, что $h^{[i]}(\tau)$ суть строки $h^{[i]}[t_\beta, \tau]$ матрицы $H[t_\beta, \tau]$, получим для вектора-строки $h'(\tau)$ следующую матричную запись:

$$h'(\tau) = l'H[t_\beta, \tau]$$

Далее имеем:

$$H[t_\beta, \tau] = X[t_\beta, \tau]B(\tau)$$

Так как, наконец,

$$X[t, \tau] = X^{-1}[\tau, t],$$

то окончательно получим:

$$h'(\tau) = l'X^{-1}[\tau, t_\beta]B(\tau)$$

Транспонируя $h'(\tau)$ по свойствам матричных произведений, найдем:

$$h(\tau) = B'(\tau)[X^{-1}[\tau, t_\beta]]'l$$

Тогда

$$s(\tau) = [X^{-1}[\tau, t_\beta]]'l = S[\tau, t_\beta]l$$

при заданном l есть не что иное, как некоторое частное решение уравнения. Более того, при $\tau = t_\beta$ имеем $s(t_\beta) = l$. Но тогда оказывается, что множество вектор-функций $h(\tau)$ определяется равенством:

$$h(\tau) = B'(\tau) s(\tau),$$

где вектор-функции $s(\tau)$ суть всевозможные решения системы управления. Смысл задачи заключается, следовательно, в том, чтобы из всех движений сопряженной системы выбрать минимальное движение $s^0(\tau)$.

Поскольку именно вычисление всех возможных решений задачи матричных вычислений является сложной задачей, она с трудом решается на обычных компьютерах. В то же время для квантовых ЭВМ данная задача таковой не является и может быть решена практически мгновенно [9, 10]. Программирование задачи может быть выполнено на девяти существующих квантовых языках программирования.

Заключение

На автомобильном транспорте квантовые технологии и вычисления, а также нейрокомпьютерный интерфейс целесообразно применять в следующих основных направлениях:

- создание квантовой системы принятия решений об опасных ситуациях на дороге;
- внедрение квантовых вычислений в совершенствование технологий управления беспилотным транспортом;
- использование квантовых технологий для решения сложных оптимизационных задач;
- применение неинвазивных нейрокомпьютерных интерфейсов для включения пешеходов в контур управления безопасным движением.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. The Digital Economy in Russia. Part 1 // Anna Maria Rada Leenders' Blog. 2018. 16 August. URL: <http://russiancouncil.ru/en/blogs/leenders/the-digital-economy-in-russia-part-1/> (дата обращения: 28.05.2024)..
2. Quantum Initiatives Worldwide 2024 // Qureca. 2024. 01 April. Updated 18 June 2024. URL: <http://www.quireca.com/quantum-initiatives-worldwide> (дата обращения: 24.06.2024).
3. Quantum Technologies in Russia / A. K. Fedorov [et al.] // Quantum Science and Technology. 2019. Vol. 4, iss. 4. Art. No. 040501. 8 p. DOI: 10.1088/2058-9565/ab4472

4. Кобзев С. А. О приоритетах в инновационной деятельности ОАО «РЖД» // Железнодорожный транспорт. 2019. № 2. С. 29–36.
5. Чаркин Е. И. Новая технологическая реальность // Автоматика, связь, информатика. 2018. № 1. С. 2–5.
6. Pokrovskaya O. D., Panychev A. Y., Khramtsova E. R. Digitalization of the Transport Industry in Russia: Trends, Drivers, Potential // Problems of Enterprise Development: Theory and Practice (PEDTR 2019): Proceedings of the 18th International Scientific Conference (Samara, Russia, 19–20 December 2019). European Proceedings of Social and Behavioural Sciences. 2020. Vol. 82. P. 341–349. DOI: 10.15405/epsbs.2020.04.44
7. Семион К. В. Стратегия цифровой трансформации // Автоматика, связь, информатика. 2019. № 4. С. 5–6.
8. Розенберг Е. Н., Уманский В. И., Дзюба Ю. В. От систем автоматизации к интеллектуальным системам управления // Автоматика, связь, информатика. 2017. № 11. С. 7–11.
9. Урусов А. В. Цифровая железная дорога // Автоматика, связь, информатика. 2018. № 1. С. 6–8.
10. Tapscott D. Grown Up Digital: How the Net Generation is Changing Your World. New York: McGraw-Hill, 2009. 384 p.

Дата поступления: 10.06.2024

Решение о публикации: 11.11.2024

A Method for Solving the Problem of Safe Traffic and Pedestrians Based on Quantum and Neurocomputer Systems

Maxim F. Saveliev

— PhD in Engineering, Associate Professor, Acting Head of the Department of Information Security. Research interests: information systems, big data processing, reliability modeling. E-mail: mfsavelev@etu.ru

Alexander V. Obukhov

— PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of Information Security. Research interests: information systems, big data processing, distributed computing. E-mail: aleks.obuhov@yandex.ru

Natalia S. Malakhova

— Postgraduate Student of the Department of Information Security. Research interests: information systems, big data processing, optimal data collection systems. E-mail: natashamalakhova95@mail.ru

Evgeny G. Vorobyov

— Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Information Security. Research interests: information systems, information security, attack modeling. E-mail: vrbyug@mail.ru

Saint Petersburg Electrotechnical University “LETI”, 5, Prof. Popov str., St. Petersburg, 197376, Russia

For citation: Saveliev M. F., Obukhov A. V., Malakhova N. S., Vorobyov E. G. A Method for Solving the Problem of Safe Traffic and Pedestrians Based on Quantum and Neurocomputer Systems // Intellectual Technologies on Transport. 2024. № 4 (40). Pp. 43–49. DOI: 10.20295/2413-2527-2024-440-43-49. (In Russian)

Abstract. *The article discusses two problems arising in the theory of optimal processes: 1) controlling a dynamical system under the condition of a minimum of the selected estimate of the intensity $\chi [u]$ of the control forces; 2) observation, i.e. calculating the current coordinates — $x_i(t)$ of a moving object from the measurable functions y_j from these coordinates. The main attention is paid to objects described by linear equations (for which, however, nonlinear laws of optimal control are derived from the minimum conditions $\chi[u]$). The solution of the problems under consideration is given, based on the methods of functional analysis based on the representation*

of observation problems and decision-making based on the closure of the control circuit based on quantum and neurocomputer technologies. Minimax rules are formulated and substantiated, which determine the optimal control actions or optimal resolving operations in cases of control and observation of a dangerous situation on the road, respectively. The duality between the processes of control and observation is discussed. The connection of the considered problems with the basic concepts of quantum information theory is established. Numerical methods for determining optimal control forces are described. The connection of the considered problems with the basic concepts of quantum information theory is established. Numerical methods for determining optimal control forces are described. The problem of control in a conflict situation of a possible collision of an unmanned controlled object with a pedestrian is considered. To solve this problem, a rule of extreme pedestrian warning is proposed, which provides a minimum of time for an accurate human response. The relationship between the solution of the problem of observation of a linear object and the canonical decomposition by Eigen elements of the motions of a dynamic system with an aftereffect is studied. The problem of calming the disturbed movements of the controlled system with the aftereffect is considered. A solution to one problem of observing the motions of a linear system under random interference is given.

Keywords: information technology, digital technology, automation, guide, integration

REFERENCES

1. The Digital Economy in Russia. Part 1 // Anna Maria Rada Leenders' Blog. 2018. 16 August. URL: <http://russian-council.ru/en/blogs/leenders/the-digital-economy-in-russia-part-1/> (data obrashcheniya: 28.05.2024).
2. Quantum Initiatives Worldwide 2024 // Qureca. 2024. 01 April. Updated 18 June 2024. URL: <http://www.quireca.com/quantum-initiatives-worldwide> (data obrashcheniya: 24.06.2024).
3. Quantum Technologies in Russia / A. K. Fedorov [et al.] // Quantum Science and Technology. 2019. Vol. 4, iss. 4. Art. No. 040501. 8 p. DOI: 10.1088/2058-9565/ab4472
4. Kobzev S. A. O prioritetah v innovacionnoj deyatelnosti OAO "RZHD" // Zheleznodorozhnyj transport. 2019. No. 2. S. 29–36. (In Russian)
5. Charkin E. I. Novaya tekhnologicheskaya real'nost' // Avtomatika, svyaz', informatika. 2018. No. 1. S. 2–5. (In Russian)
6. Pokrovskaya O. D., Panychev A. Y., Khrantsova E. R. Digitalization of the Transport Industry in Russia: Trends, Drivers, Potential // Problems of Enterprise Development: Theory and Practice (PEDTR 2019): Proceedings of the 18th International Scientific Conference (Samara, Russia, 19–20 December 2019). European Proceedings of Social and Behavioural Sciences. 2020. Vol. 82. P. 341–349. DOI: 10.15405/epsbs.2020.04.44.
7. Semion K. V. Strategiya cifrovoj transformacii // Avtomatika, svyaz', informatika. 2019. No. 4. S. 5–6. (In Russian)
8. Rozenberg E. N., Umanskij V. I., Dzyuba Yu. V. Ot sistem avtomatiki k intellektual'nym sistemam upravleniya // Avtomatika, svyaz', informatika. 2017. No. 11. S. 7–11. (In Russian)
9. Urusov A. V. Cifrovaya zheleznaya doroga // Avtomatika, svyaz', informatika. 2018. No. 1. S. 6–8. (In Russian)
10. Tapscott D. Grown Up Digital: How the Net Generation is Changing Your World. New York: McGraw-Hill, 2009. 384 p.

Received: 10.06.2024

Accepted: 11.11.2024