



АВТОМАТТАНДЫРУ ЖӘНЕ БАСҚАРУ
АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ
AUTOMATION AND CONTROL

DOI 10.51885/1561-4212_2023_3_145
MPHTI 50.01.85

**И.А. Пирманов¹, Е.Е. Куанов¹, К. Алибеккызы², В.К. Тулаев³, Ж.К. Азаматова²,
А.Т. Байдилдина²**

¹Академия гражданской авиации, Алматы, Казахстан

²Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева,
г. Усть-Каменогорск, Казахстан

³Северо-Казахстанский университет имени Манаша Козыбаева, г. Петропавл, Казахстан

E-mail: ildar.pirmanov@mail.ru*

E-mail: Erkanatkuann@mail.ru

E-mail: Karlygash.eleusizova@mail.ru

E-mail: tvk30091949@mail.ru

E-mail: zhanerkeaz@mail.ru

E-mail: atj-43@mail.ru

ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ В ПРОИЗВОДСТВЕННОМ ПРОЦЕССЕ РЕМОНТА АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

АВИАЦИЯЛЫҚ ТЕХНИКАНЫ ЖӨНДЕУДІҢ ӨНДІРІСТІК ПРОЦЕСІНДЕ ЦИФРЛЫҚ ЕГІЗДЕРДІ ҚОЛДАНУ

APPLICATIONS OF DIGITAL TWINS IN THE PRODUCTION PROCESS OF REPAIR OF AIRCRAFT EQUIPMENT

Аннотация. В статье рассмотрена методология применения цифровых двойников в техническом обслуживании и ремонте воздушного транспорта. В результате оцифровки формируются комплекс документов и прикладное программное обеспечение в среде виртуальной реальности. Представлена концепция цифрового двойника в контексте модельно-ориентированного системного проектирования процесса обслуживания вертолета по техническому регламенту. На основе технологий статистического моделирования разработана модель сборки авиационных агрегатов, в которой предложена связь временных характеристик, как качественных оценок процессов обучения и эффективности применения цифровых двойников, с количеством тренингов на реальном оборудовании. Представлены результаты экспериментальных исследований на основе метода анализа аттестации обучающихся.

Ключевые слова: вертолет, ремонт, цифровой двойник, обучение, авиация, модели, регрессия.

Аңдатпа. Мақалада сандық егіздерді әуе көлігіне техникалық қызмет көрсету және жөндеуде пайдалану әдістемесі талқыланады. Цифрландыру нәтижесінде виртуалды шындық ортасында құжаттар жиынтығы мен қолданбалы бағдарламалық қамтамасыз ету қалыптасады. Цифрлық егіз тұжырымдамасы техникалық регламентке сәйкес тікұшаққа техникалық қызмет көрсету процесінің үлгілік жүйелік дизайны контекстінде ұсынылған. Статистикалық модельдеу технологиялары негізінде нақты жабдық бойынша оқулар санымен оқу үдерістерін сапалы бағалау және цифрлық егіздерді пайдалану тиімділігі ретінде уақыт сипаттамалары арасындағы байланысты ұсынатын ұшақ қондырғыларын құрастыру моделі әзірленді. Студенттердің аттестациясын талдау әдісіне негізделген эксперименттік зерттеулердің нәтижелері берілген.

Түйін сөздер: тікұшақ, жөндеу, цифрлық егіз, оқыту, авиация, модельдер, регрессия.

Abstract. *The article discusses the methodology for using digital twins in the maintenance and repair of air transport. As a result of digitization, a set of documents and application software are formed in a virtual reality environment. The concept of a digital twin is presented in the context of a model-based system design of the helicopter maintenance process according to the technical regulations. On the basis of statistical modeling technologies, a model for assembling aircraft units has been developed, which proposes a connection between time characteristics, as qualitative assessments of learning processes and the effectiveness of using digital twins, with the number of trainings on real equipment. The results of experimental studies based on the method of analysis of students' certification are presented.*

Keywords: *helicopter, repair, digital twin, training, aviation, models, regression*

Введение. Анализ материалов в области цифровой трансформации и технологий в формате цифровых двойников, опубликованных в научных статьях, отчетах, социально-экономических программах и производственных планах, показал, что в настоящее время в данной научно-практической среде еще не сформировались четкие обоснованные стандарты и понятия в следующем: что такое реальность; что такое виртуальность; что является дополненной реальностью. История обсуждения этой темы уходит корнями еще в древнегреческую философию.

По мнению авторов, к этой проблеме надо подходить с системных методологических позиций, где тоже присутствует множество вопросов и неопределенностей, но безальтернативно считается, что надо начинать в любой новой работе с формулировки и обоснования цели. Выбор цели следует считать главной проблемой, особенно в начальной фазе, любого нового исследования или проекта. Редко где, по мнению авторов данной работы, выбор цели сделан правильно и довольно часто цель подменяется задачей, функции системы ошибочно подменяются средствами достижения цели. Проблематичность и ключевая значимость этого системного проектного этапа детально рассматривается в работе Надлера Д, Хибино Ш. [1,2].

Главные практические вопросы, которые возникают в исследованиях цифровых двойников, состоят в том: где заканчиваются органолептические ощущения и начинаются виртуальные моделируемые образы, что является дополнением реального мира, чтобы это дополнение можно было назвать дополненной реальностью, какие риски и их значимость возникают в этой среде. В любом из приводимых в открытой печати исследовании количественная оценка качества объекта или процесса опирается на эмпирические результаты, и в каждом исследовании декларируется требование достижения цели, или утверждается, что цель уже достигнута, причем достигнута «точно». При этом, в условиях параметрической нечеткости и неопределенности данных, что встречаются в каждом без исключения проекте или исследовании, не приводится детального исследования всей траектории формирования конечной неопределенности полученного результата, что и являлось бы конечной системной оценкой точности.

Обозначенные проблемы ставят задачи, которые в определенном объеме рассматриваются в предлагаемой статье. Научно-практические задачи в предлагаемой статье решаются на примере технического обслуживания и ремонта авиационной техники, так как именно в этой отрасли появились наиболее значимые теоретические и практические результаты, так и возникшие проблемы.

Литературный обзор. В работе [3, 4, 5] отмечается, что в авиации на всех этапах жизненного цикла изделия традиционные подходы в технологиях проектирования, производства и эксплуатации показывают на практике свою крайнюю неэффективность, и возникает «необходимость фундаментального сдвига» в этой системе и рождения новой «парадигмы». Этой парадигмой является «цифровой двойник», который на базе

«моделирования сверхвысокой точности» интегрированный в бортовую систему управления техническим состоянием воздушного судна, используя доступные исторические данные системы эксплуатации, обеспечит беспрецедентный уровень безопасности и надежности полетов. Подобная концепция, в которой программные модели имитируют реальность на основе информации, поступающей из физического мира, была предложена Дэвидом Гелернтером в 1991 г. и получила название «Зеркальные миры» [5, 6, 7]. Данные подходы, выраженные как новая концепция цифровых двойников была впервые предложена М. Гривзом в 2002 г. в Мичиганском университете [8, 9, 10]. Предлагаемая автором концептуальная модель содержит три агента: агент реального пространства, агент виртуального пространства и информационного агента. Все три агентные модели агрегируются программно в единую систему, где субъекту управления отводится определенная роль.

К 2006 г. название концептуальной модели, предложенной Гривзом, было изменено на «Модель зеркалирования информации». В подобной трансформации акцентируется механизм связи между двумя пространствами (виртуальным и реальным) с обратной связью между ними, и уже предполагается возможность множества виртуальных пространств для одного реального пространства. Как показывает практика, внедрение цифровых двойников будет расти в геометрической прогрессии. Это явление приводит к терминологической путанице.

В работах [11, 12, 13] также указывается, что давно появилась необходимость в разработке некоторых стандартов, в которых должны более точно определяться основные понятия в новой технологии – цифровой двойник, так как цифровой двойник в настоящее время уже применяется на всех этапах жизненного цикла изделия. В данном стандарте вводится единое определение цифрового двойника, а его цифровая трансформация рассматривается как система.

В авиационной отрасли процесс цифровой трансформации рассматривается дифференцировано по отдельным фазам жизненного цикла воздушного судна. На фазе технического обслуживания и ремонта самолета цифровая трансформация осуществляется в два этапа. На первом этапе выполняется оцифровка эксплуатационной документации самолётов и БПЛА. Этот цифровой документ и прилагаемое программное обеспечение называется интерактивное электронное техническое руководство, которое используется при осмотре и ремонте самолётов.

Автор работы указывает, что «Моделирование вертолета – невероятно сложная задача» и расчетная модель должна быть «очень точной». Под моделью понимается очень большой комплекс моделей, состоящий из 500 отдельных моделей, работающих в режиме реального времени. В математическом обеспечении цифрового двойника ключевое значение приобретает исходный код, который подвергается постоянному контролю. Математическое, программное и информационное обеспечение являются системными средствами прогнозирования. Несмотря на приводимые оценки прогнозов, как «точные прогнозы», количественное измерение точности не указывается, из чего следует предполагать, что системная точность не превышает 10 %, что является недостаточным метрологическим уровнем качества.

Методы исследования. Работа состоит из теоретических исследований, опирающихся на формальную платформу и экспериментальных исследований реальных массовых динамических процессов. В качестве разделов и аппаратов формализации исследуемых процессов использовались теория вероятностей и математическая статистика, имитационное моделирование, теория нечетких множеств, методы экспертных оценок, агентный подход. Для обработки экспериментальных данных использовался аппарат

математической статистики и профессиональный программный пакет Statistica. На заключительной фазе исследований предусматривалась оценка адекватности теоретических предпосылок практическим данным из сферы эксплуатации реальных объектов. Контекстным функционалом в исследовании рассматривался процесс контроля.

Результаты исследования. В настоящее время цифровые компьютерные технологии, и в частности цифровые двойники, существенно повышают эффективность технического обслуживания и ремонта агрегатов воздушного судна. В этой среде ключевую роль играет математическое обеспечение и особенно статистическое и имитационное моделирование [13,14,15]. Статистическое моделирование – один из разделов в математическом обеспечении процессов цифровой трансформации технического обслуживания и ремонта сложных систем, поскольку широко используется при решении следующих важных задач:

1) создание технического регламента технологических процессов (ТП) сборки авиационных агрегатов;

2) разработка оптимальных алгоритма ТП сборки агрегатов;

3) оптимизация и синтез ТП.

В технический регламент ТП сборки авиационных агрегатов включаются следующие сведения о каждом элементе: физическая природа, место, последовательность, параметры, характеристики, взаимодействие, влияние. Также могут учитываться: идея исследования, описание зависимостей, таблицы и графики, начальные условия.

Алгоритм сборки авиационного агрегата с учетом особенностей ТП создается на основе математической модели и представляется в виде блок-схемы или текстового описания операторов – группа элементарных операций.

Операторы по назначению подразделяются на следующие подгруппы:

– основные – представляют описание и функционирование моделей реальных элементов и процессов при внешних воздействиях, а также имитация элементарных операций;

– вспомогательные – производят вычисления для реализации основных операторов;

– служебные – обеспечивают синхронизацию и взаимодействие операций, регистрацию результатов измерения и обработку.

При моделировании технологических процессов сборки авиационных агрегатов используются следующие операторы:

– вычислительные;

– генерирования случайных процессов и чисел;

– формирования стабилизированных характеристик;

– считыватели количества элементов и процессов.

При построении статистической модели обычно операции разделяются на единичные процессы – элементарные акты.

При моделировании авиационных агрегатов операции проводятся над инструментами и неразборными деталями по принципу ведущий и ведомые, в результате которого изменяются характеристики ведущей детали за счет присоединения, т.е. $W \rightarrow n$ (n – количество элементов в агрегате) и сокращается количество ведомых, т.е. $V \rightarrow 0$.

Зависимость параметров сборки авиационного агрегата

$$P_j = f(a_j, a_{i_1}, a_{i_2}, \dots, a_{i_K}, c_1, c_2, \dots, c_R),$$

где a_j – параметр, характеризующий подготовку и установку ведущей детали W к сборке j -го агрегата;

$a_{i_1}, a_{i_2}, \dots, a_{i_K}$ – параметры, ведомых деталей V ;

K – количество ведомых деталей;

c_2, \dots, c_R – случайные параметры инструмента;

R – количество инструментов, необходимых для сборки агрегата.

Длительность сборки авиационного агрегата представляется в виде последовательной суммы временных интервалов:

$$t_j^{mes} = t_j^{beg} + \sum_{k=1}^K t_j^u(k) + \sum_{k=1}^K t_j^{pod}(k) + \sum_{r=1}^R t_j^{ins}(r) + t_j^{reg},$$

где t_j^{beg} – временной интервал подготовки агрегата к сборке;

$t_j^u(k)$ – интервал установки k -ой детали;

$t_j^{pod}(k)$ – интервал подготовки детали к сборке;

$t_j^{ins}(r)$ – временной интервал работы с r -ым инструментом;

t_j^{reg} – время регулировки агрегата с переходом к сборке последующего агрегата.

Использование цифровых двойников, как показывает практика использования этой технологии в различных отраслях, существенно повышает компетенции специалистов и, как следствие, общую эффективность производственных процессов. С целью оценки эффективности цифровых двойников в данной предметной области были проведены специальные исследования в конкретных производственных условиях авиаремонтного предприятия. Были получены следующие результаты:

1. Общее количество N цифровых двойников авиационных агрегатов DT_N для авиаремонтного предприятия определяется следующей зависимостью

$$DT_N = DT_{N1}^{Mech} + DT_{N2}^{El},$$

где DT_{N1}^{Mech} – цифровые двойники агрегатов с механическими элементами общим количеством $N1$, предназначенные для обучения механиков;

DT_{N2}^{El} – цифровые двойники агрегатов с радиоэлектронными компонентами общим количеством $N2$, предназначенные для обучения электронщиков.

2. Все производственные процессы по ремонту авиационной техники реализуются в строгом соответствии с технической картой, поэтому на них влияют разного рода факторы:

- случайные возмущения;
- правильная последовательность организации производства;
- надежность оборудования;
- синхронизация процессов.

В этих условиях необходимо определить оценку или параметр, которые бы эффективно и правильно отражали знания и практические компетенции обучающихся.

Естественно, аттестацию необходимо проводить для механиков и электронщиков отдельно. Независимо от вида аттестации используются два варианта с фиксированным количеством агрегатов, т.е. $N = K = const$.

Первый вариант традиционный и, конечно, наиболее достоверный. Однако применение цифровых двойников дает существенный эффект и преимущества для обучения.

На авиаремонтных предприятиях в качестве оценочного параметра предлагается использовать время сборочных или разборочных операций. Именно все факторы, связанные с неточностью или неправильной очередностью сборки агрегатов, повлияют на выбранный параметр:

– в первом случае t^{RO} – время аттестации с обучением на реальных объектах RO ; значение определяется эмпирически на основе рекомендаций специалистов предприятий:

$$t^{RO} = \sum_{n=1}^N t_n^{RO},$$

– во втором случае $t^\Sigma = t^{DT} + \Delta t^{RO}$ – время аттестации, равное сумме времени обучения (t^{DT}) на цифровых двойниках и дополнительному временному интервалу на реальных объектах (Δt^{RO}) при сохранении главного условия качественного обучения $t^{RO} = t^\Sigma$, т.е. в соответствии с выражением

$$t^\Sigma = \sum_{k=1}^{K1} t_k^{DT} + \sum_{k=1}^{K2} t_k^{RO},$$

где $K1$ – число цифровых двойников;

$K2$ – число реальных агрегатов.

3. Время дополнительного обучения Δt^{RO} эффективно представить в виде относительного коэффициента

$$[\Delta t^{RO}] = (t^{RO} - t^{DT})/t^{RO}.$$

Если $[\Delta t^{RO}] \geq -1$, то обучающегося необходимо отправить на повторное обучение на реальных объектах, поскольку он не склонен к использованию цифровых технологий при обучении.

Если $-1 \leq [\Delta t^{RO}] \leq 1$, то обучающийся должен пройти последовательные тренировки (тренинги) на реальных объектах R в соответствии с выражением

$$R = f((t^{RO} - t^{DT})/t^{RO}).$$

Результаты экспериментально-статистических исследований и компьютерного моделирования. Рассмотрим применение метода анализа результатов аттестации обучающихся с применением цифровых двойников сборки авиационных агрегатов.

На рис.1 представлены эмпирические данные в графической форме.

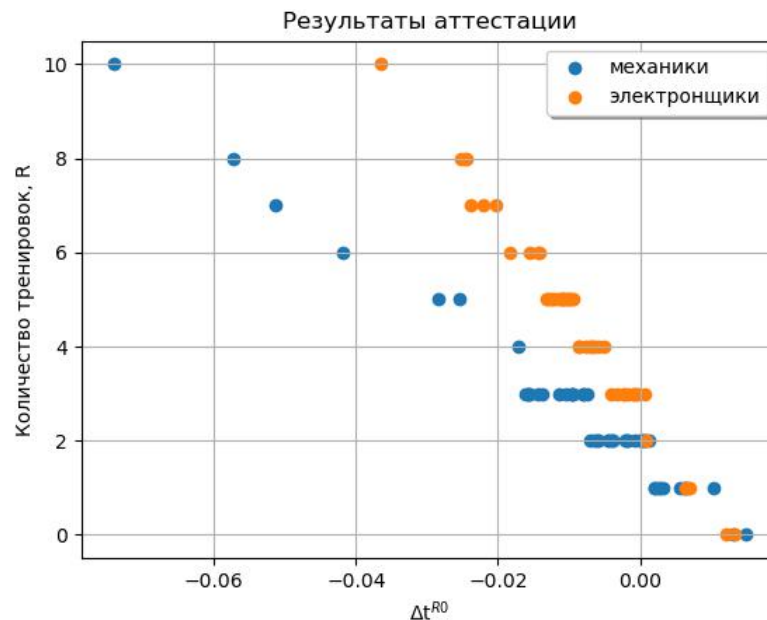


Рисунок 1. Результаты аттестации

По графикам рис. 1 можно сделать вывод о существовании зависимости между $[\Delta t^{RO}]$ и количеством тренировок R . Если предположить, что зависимость приблизительно линейная, то ее можно представить в виде прямой на этом графике. По этой прямой и можно будет предсказывать необходимое количество тренингов, если известно $[\Delta t^{RO}]$, т.е. следует решить задачу регрессии.

Линейный алгоритм в задачах регрессии можно представить в виде:

$$a(x) = w_0 + \sum_{i=1}^d w_i x_i, \quad (1)$$

где w_0 – свободный член;

w_i – веса признаков;

x_i – признаки.

Выражение (1) можно представить в более компактном виде, если ввести дополнительный признак $(d + 1)$, равный 1 для каждого объекта:

$$a(x) = \sum_{i=1}^{d+1} w_i x_i = \langle w, x \rangle, \quad (2)$$

Выражение (2) можно рассматривать как скалярное произведение двух векторов w и x .

В качестве функции ошибки выбирается дисперсия:

$$Q\langle w, x \rangle = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l (\langle w, x_i \rangle - y_i)^2, \quad (3)$$

где l – общее число образцов;

y – прогнозное значение.

В соответствии с формулой (3) обучение модели линейной регрессии можно представить в матричном виде:

$$Q(w, X) = \frac{1}{l} \|Xw - y\|_w^2 \rightarrow \min_w. \quad (4)$$

Для получения модели регрессии были использованы численные методы оптимизации. Так как функция (3) выпуклая и гладкая, то для нахождения ее минимума можно применить метод градиентного спуска. Формула вычисления градиента в общем случае имеет вид:

$$\nabla_w Q(w, X) = \frac{2}{l} X(Xw - y). \quad (5)$$

В результате, в соответствии с представленной методикой, были получены модели линейной регрессии для процесса аттестации механиков и электронщиков:

$$R_{meh} = -109,4 \times \Delta t^{RO} + 1,658,$$

$$R_{elec} = -207,8 \times \Delta t^{RO} + 2,620.$$

На рис. 2 показан результат решения задачи регрессии по имеющимся данным.

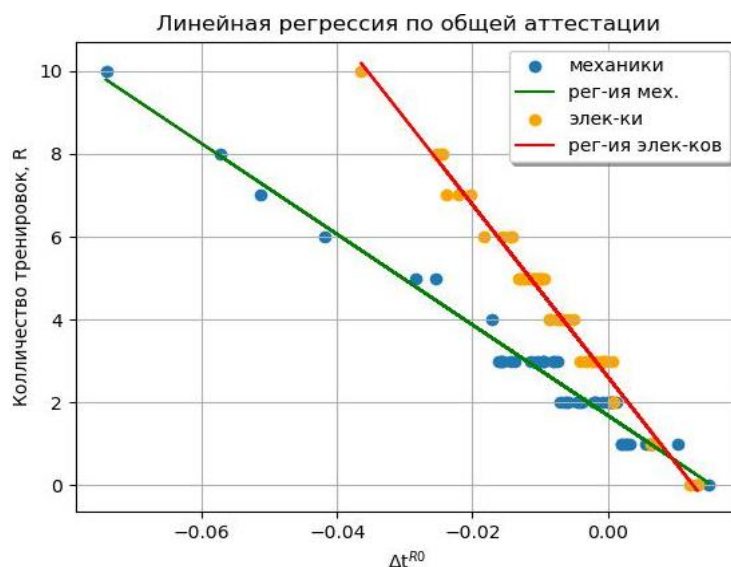


Рисунок 2. Регрессионные модели для процесса аттестации

Выводы. Рассмотрено решение проблемы цифровой трансформации авиационной отрасли по фазе технического обслуживания и ремонта воздушного судна. На первом этапе осуществляется оцифровка эксплуатационной документации с созданием цифрового документа и прикладного программного обеспечения в виде цифрового двойника в среде виртуальной или дополненной реальности.

Представлена концепция цифрового двойника в контексте модельно-ориентированного системного проектирования, включающего особенности технического обслуживания вертолета по техническому регламенту и с использованием Big Data. Цифровой двойник виртуально агрегирует физическое оборудование оригинала: бортовые и внешние датчики, коммуникационные интерфейсы и прочую технику.

Приведены результаты экспериментальных исследований с применением метода анализа аттестации обучающихся с применением цифровых двойников при сборке авиационных агрегатов. Установлено, что на производственном участке авиаремонтного предприятия эффективно применять обучение на первом этапе с применением цифровых двойников, а на втором – с применением реальных объектов.

На основе анализа экспериментальных данных получены регрессионные модели связи количества тренировок на втором этапе для успешной аттестации механиков и электронщиков.

Список литературы

1. Цифровой Казахстан – официальный сайт Государственной программы «...digitalkz.kz
2. Роджерс Д.Л. Цифровая трансформация: практическое пособие / пер. с англ. – М.: Точка, 2017. – С. 7.
3. Грибанов Ю.И. Цифровая трансформация социально-экономических систем на основе развития института сервисной интеграции: дис. ... д-ра экон. наук. – СПб.: Санкт-Петербургский государственный экономический университет, 2019. – URL: <https://unecon.ru/sites/default/files/dissgribanovui.pdf> (дата обращения: 08.10.2020).
4. Прохоров А., Коник Л. Цифровая трансформация: анализ, тренды, мировой опыт. – М.: АльянсПринт, 2019. – 368 с.
5. Абдрахманова Г.И., Быховский К.Б., Веселитская Н.Н., Вишневский К.О., Гохберг Л.М. Цифровая трансформация отраслей: стартовые условия и приоритеты // XXII Международная

- научная конференция по проблемам развития экономики и общества. – Москва, 2021 г. – С. 11-16.
6. <https://www.gim-international.com/content/article/bridging-the-gap-between-geospatial-and-constructi...>
 7. Big Data - что такое системы больших данных? Развитие... . – promdevelop.ru/industry/big-data.
 8. Большие данные в авиации: 4 практических примера. – bigdataschool.ru/blog/большие-данны...
 9. Цифровые двойники: кто и зачем их использует. – dzen.ru/...cifrovye-dvoyniki-kto...zachem...ispolzuet-...
 10. Устойчивое развитие и цифровые двойники. – habr.com/ru/company/ds/blog/566252/
 11. J. Reis, M. Amorim, N. Melão, and P. Matos, Digital transformation: a literature review and guidelines for future research // WorldCIST'18 2018: Trends and Advances in Information Systems and Technologies, Mar. 2018. – Pp. 411-421. – doi: 10.1007/978-3-319-77703-0_41.
 12. M. Alenezi, "Ontology-based context-sensitive software security knowledge management modeling // International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE). – 2020. – Vol. 10, no. 6. – Pp. 6507–6520. – doi: 10.11591/ijece.v10i6.pp6507-6520.
 13. S. N. Luko, Risk assessment techniques // Quality Engineering. – 2014. – Vol. 26. – No. 3. – Pp. 379-382. – doi:10.1080/08982112.2014.875769.
 14. O.I. Larichev, Theory and methods of decision-making, as well as the Chronicle of events in Magic Countries: Textbook. – М.:Logos, 2000.
 15. N. Wiener, Cybernetics, or control and communication in animal and machine [translation from English]. –М.: Nauka; Mainedition of publications for foreign countries, 1983. – P. 344.

References

1. Cifrovoy Kazahstan – oficial'nyj sajt Gosudarstvennoj programmy «...digitalkz.kz
2. Rodzhers D.L. Cifrovaya transformaciya: prakticheskoe posobie / per. s angl. – М.: Tochka, 2017. – S. 7.
3. Griбанov YU.I. Cifrovaya transformaciya social'no-ekonomicheskikh sistem na osnove razvitiya instituta servisnoj integracii: dis. ... d-ra ekon. nauk. – SPb.: Sankt-Peterburgskij gosudarstvennyj ekonomicheskij universitet, 2019. – URL: <https://unecon.ru/sites/default/files/dissgribanovui.pdf> (data obrashcheniya: 08.10.2020).
4. Prohorov A., Konik L. Cifrovaya transformaciya: analiz, trendy, mirovoj opyt. – М.: Al'yansPrint, 2019. – 368 s.
5. Abdrahmanova G.I., Byhovskij K.B., Veselitskaya N.N., Vishnevskij K.O., Gohberg L.M. Cifrovaya transformaciya otraslej: startovye usloviya i priority // XXII Mezhdunarodnaya nauchnaya konferenciya po problemam razvitiya ekonomiki i obshchestva. – Москва, 2021 г. – С. 11-16.
6. <https://www.gim-international.com/content/article/bridging-the-gap-between-geospatial-and-constructi....>
7. Big Data - что такое системы больших данных? Развитие... . – promdevelop.ru/industry/big-data.
8. Bol'shie dannye v aviicii: 4 prakticheskikh primera. – bigdataschool.ru/blog/bol'shie-dann...
9. Cifrovye dvojniki: kto i zachem ih ispol'zuet. – dzen.ru/...cifrovye-dvoyniki-kto...zachem...ispolzuet-...
10. Ustojchivoe razvitie i cifrovye dvojniki. – habr.com/ru/company/ds/blog/566252/
11. J. Reis, M. Amorim, N. Melão, and P. Matos, Digital transformation: a literature review and guidelines for future research // WorldCIST'18 2018: Trends and Advances in Information Systems and Technologies, Mar. 2018. – Pp. 411-421. – doi: 10.1007/978-3-319-77703-0_41.
12. M. Alenezi, Ontology-based context-sensitive software security knowledge management modeling // International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE). – 2020. – Vol. 10, no. 6. – Pp. 6507–6520. – doi: 10.11591/ijece.v10i6.pp6507-6520.
13. S. N. Luko, Risk assessment techniques // Quality Engineering. – 2014. – Vol. 26. – No. 3. – Pp. 379-382. – doi:10.1080/08982112.2014.875769
14. O. I. Larichev, Theory and methods of decision-making, as well as the Chronicle of events in Magic Countries: Textbook. – М.: Logos, 2000.
15. N. Wiener, Cybernetics, or control and communication in animal and machine // [translation from English]. – М.: Nauka; Mainedition of publications for foreign countries. –1983. – P. 344.