

МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ СТРУКТУРЫ ОСНОВНЫХ ФОНДОВ ПРЕДПРИЯТИЯ В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ

Георгий Всеволодович КОЛЕСНИК ^{a,*},
Михаил Борисович РЫБАКОВ ^b

^a доктор экономических наук, доцент, заместитель директора
Центра компетенций цифровой экономики,
Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова,
Москва, Российская Федерация
Kolesnik.GV@rea.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0695-5038>
SPIN-код: 9698-4915

^b исполнительный директор по производству,
АО «Вертолеты России»,
Москва, Российская Федерация
rybakovmb@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-8924-0366>
SPIN-код: 5868-9736

* Ответственный автор

История статьи:

Рег. № 482/2020
Получена 25.08.2020
Получена в
доработанном виде
20.09.2020
Одобрена 22.10.2020
Доступна онлайн
26.02.2021

УДК 338.32; 658.58
JEL: D24, L23

Ключевые слова:

основные средства, парк, задачи планирования инвестиционной и операционной деятельности многокритериальная оптимизация, экономическая эффективность, надежность

Аннотация

Предмет. Повышение эффективности использования основных производственных фондов является одной из приоритетных задач, стоящих перед современными предприятиями машиностроения. Особенно актуальной она является для территориально-распределенных холдинговых структур, возникших в процессе реформирования отечественного машиностроительного комплекса и включающих в себя предприятия, производящие схожую продукцию и имеющие аналогичные типы производственных активов.

Цели. Разработка подходов и инструментария для решения задач оптимизации режимов развития и использования парков основных средств промышленных предприятий на основе математического моделирования.

Методология. В исследовании использованы методы математического моделирования экономических процессов, теории марковских цепей, а также многокритериальной оптимизации.

Результаты. Предложен подход к анализу жизненного цикла парка основных средств системы предприятий на основе теории марковских цепей. Разработана математическая модель жизненного цикла парка основных средств, сформулированы задачи оптимизации процессов его развития с учетом экономической целесообразности и надежности. Описан стационарный режим функционирования парка основных средств в условиях ограничений на надежность и объем финансирования их развития. На основе разработанного инструментария могут решаться задачи планирования инвестиционной и операционной деятельности территориально-распределенной системы предприятий, в частности, оптимизация инвестиций в развитие производственных мощностей, планирование их технического обслуживания и ремонтов, распределение загрузки между отдельными предприятиями системы.

Выводы. Использование современных цифровых технологий,

обеспечивающих динамическое прогнозирование и оптимизацию состояния парков основных средств, позволяет достичь ряда улучшений, начиная от сокращения сроков и стоимости производства и заканчивая обоснованным сокращением доли неэффективно используемых средств производства.

© Издательский дом ФИНАНСЫ и КРЕДИТ, 2020

Для цитирования: Колесник Г.В., Рыбаков М.Б. Модель оптимизации структуры основных фондов предприятия в условиях цифровой трансформации // *Экономический анализ: теория и практика*. – 2021. – Т. 20, № 2. – С. 357 – 378.
<https://doi.org/10.24891/ea.20.2.357>

Введение

Одним из важных эффектов цифровой трансформации производственных предприятий является повышение эффективности использования их активов, в том числе основных производственных фондов. Особую актуальность эта задача приобретает для холдинговых структур, возникших в процессе реформирования высокотехнологичных отраслей машиностроения (авиастроительной, судостроительной, оборонно-промышленного комплекса) и включающих в себя предприятия, производящие схожую продукцию и располагающие аналогичными типами производственных активов [1, 2].

Крупные производственные предприятия с распределенной территориальной структурой до настоящего времени не имели возможности создания производственных планов повышенной гибкости из-за сложности и трудоемкости обработки информации о состоянии загрузки всех производственных мощностей, их совместимости и взаимном дополнении. Однако использование современных цифровых технологий, обеспечивающих динамическое прогнозирование и оптимизацию состояния таких систем, позволяет достичь ряда улучшений, начиная от сокращения сроков и стоимости производства и заканчивая обоснованным сокращением неэффективно используемых производственных площадей [3]. Обеспечение более высокой, в безрисковых пределах, загрузки производственных мощностей будет способствовать росту прибыли и повышению финансовой устойчивости как отдельных предприятий, так и холдинговой структуры в целом [4].

Динамическая оптимизация использования основных средств должна учитывать режимы их эксплуатации и технического обслуживания с учетом стадии жизненного цикла, индивидуальных характеристик, а также локальных нормативных документов и стандартов, регламентирующих данные процессы [5].

Как правило, состав основных средств крупного промышленного предприятия неоднороден. Он характеризуется, в частности:

- большим количеством возможных состояний объектов;
- наличием ресурсов, совместно используемых в процессе их эксплуатации;
- наличием случайных факторов, влияющих на процесс эксплуатации.

Помимо этого, совершенствование технологий приводит к необходимости совместного использования в производстве объектов основных средств разных поколений [6, 7]. В результате возникает потребность в адаптации существующих на предприятии процессов и ресурсов к эксплуатации объектов основных средств новых поколений. Дополнительные проблемы с организацией эксплуатации, технического обслуживания и ремонта объектов основных средств различных типов возникают в условиях санкций, а также при реализации предприятиями программ импортозамещения [8].

Все указанные факторы приводят к увеличению сложности задачи оценки текущего состояния и потенциала использования основных средств, а также требуют применения вычислительных моделей и методов для ее решения.

Для агрегирования информации об основных средствах крупномасштабных производственных систем целесообразно рассматривать наряду с отдельными объектами также их совокупность – парки основных средств. Статистический анализ их характеристик позволяет выявить для парков основных средств свойства, аналогичные жизненному циклу отдельных объектов.

Нами рассматривается подход к решению задач оптимизации режима развития парка основных средств на основе математического моделирования. Описывается математическая модель жизненного цикла парка основных средств, на основе которой может решаться широкий спектр задач по оптимизации инвестиций в их развитие, планированию технического обслуживания и ремонтов, а также распределению загрузки.

Модель жизненного цикла парка основных средств

В научной литературе в основном исследован жизненный цикл отдельных объектов основных средств¹ [6, 9]. В то же время анализ жизненных циклов парков основных средств осуществляется, как правило, на базе эмпирических методов, с минимальным привлечением математических моделей. В результате этого задачи оптимизации загрузки, процессов технического обслуживания и ремонтов в разрезе парков основных средств оказываются формализованы в недостаточной степени, что делает невозможным полномасштабное применение цифровых технологий для определения оптимального режима их функционирования [10].

¹ Чихачева О.А., Соловьева И.П., Асаева Т.А. Моделирование процесса обновления активной части основных фондов предприятия промышленного комплекса // Современные тенденции в фундаментальных и прикладных исследованиях: материалы II Международной научно-практической конференции. Рязань: Центр фундаментальных и прикладных исследований, 2015. С. 85–87.

В связи с тем, что парк основных средств представляет собой совокупность большого количества сложных объектов, построение детализированной функциональной модели каждого из которых является отдельной сложной задачей, описание его жизненного цикла может быть проведено с использованием статистических методов.

В рамках жизненного цикла парка основных средств могут быть выделены следующие этапы:

- формирование парка, включающее приобретение (создание), установку и ввод в эксплуатацию объектов основных средств;
- динамическое равновесие, представляющее собой процесс нормальной эксплуатации парка основных средств, в ходе которой естественная их убыль в результате износа компенсируется за счет ввода новых объектов;
- старение, в процессе которого естественная убыль не компенсируется объектами данного типа в связи с прекращением их выпуска;
- переоснащение, в ходе которого выводимые из эксплуатации устаревшие морально и/или физически объекты парка заменяются объектами нового поколения.

Совершенствование технологий и элементной базы объектов основных средств, используемых в производственном процессе, приводит к усложнению жизненного цикла парка. Наличие нескольких поколений основных средств со схожей функциональностью требует использования многовариантной системы технического обслуживания и ремонтов, адаптированной к совместной их эксплуатации [7]. Повышаются требования к наличию на предприятиях-изготовителях и обслуживающих участках необходимой оснастки, запасных частей и расходных материалов, что приводит к росту издержек, связанных с обслуживанием парков основных средств.

Наличие большого числа факторов, оказывающих воздействие на режимы использования и состояние объектов основных средств, приводит к тому, что функционирование парка происходит в условиях стохастической неопределенности. Для учета данных условий рассмотрим математическую модель, описывающую жизненный цикл парка основных средств с использованием аппарата цепей Маркова [11]. С формальной точки зрения парк основных средств в модели может быть представлен как совокупность объектов, которые в каждую единицу времени могут находиться в одном из следующих состояний:

- 1) поступление и ввод в эксплуатацию – этап начала использования объекта основных средств в производственном процессе;

- 2) использование в производственном процессе;
- 3) текущий ремонт, как правило, проводимый на территории и силами эксплуатирующей организации;
- 4) капитальный ремонт, в том числе фирменный, проводимый на территории и силами производителя объекта основных средств;
- 5) модернизация – обеспечение соответствия объекта основных средств новым требованиям, нормам, техническим условиям и т.д.;
- 6) списание и утилизация – изъятие объекта из производственного процесса.

Переход объекта из состояния i в состояние j описывается распределением Пуассона с интенсивностями λ_{ij} (рис. 1), измеряемыми в количестве событий в единицу времени. При этом вероятность перехода определяется состоянием, в котором объект находится в текущий момент, и не зависит от предшествующих его состояний. Возможные направления перехода определяются в соответствии со стадиями жизненного цикла объектов. Основное перемещение происходит через стадии 1 → 2 → 6. На стадии эксплуатации 2, в зависимости от состояния и ремонтной стратегии предприятия, объект может переходить в состояния ремонтов (3, 4) и модернизации (6). На модернизацию объекты могут также направляться из капитального ремонта.

Оценка интенсивностей переходов λ_{ij} производится исходя из характеристик инвестиционной и производственной стратегий предприятия, а также системы технического обслуживания и ремонтов. К настоящему времени разработано большое количество моделей формирования интенсивностей переходов² [11]. Параметры данных моделей могут корректироваться с учетом изменения экономических, технических, производственных и других факторов.

Представление жизненного цикла объекта основных средств в виде марковского процесса дает возможность определить состояние парка объектов как средние характеристики рассматриваемой системы, которые могут быть найдены на основе системы дифференциальных уравнений Колмогорова.

Обозначим через N множество объектов, составляющих парк. Состояние парка в каждый момент времени t будет определяться разбиением N на подмножества $N_i(t)$ объектов, находящихся в i -м состоянии. Очевидно, должны быть выполнены условия

$$N_i(t) \cap N_j(t) = \emptyset \text{ для } i \neq j; N = \bigcup_{i=1, \dots, 6} N_i(t).$$

² Чихачева О.А., Соловьева И.П., Асаева Т.А. Моделирование процесса обновления активной части основных фондов предприятия промышленного комплекса // Современные тенденции в фундаментальных и прикладных исследованиях: материалы II Международной научно-практической конференции. Рязань: Центр фундаментальных и прикладных исследований, 2015. С. 85–87.

Отсюда следует, что число объектов, находящихся в момент t в i -м состоянии $X_i(t)$ будет удовлетворять условию

$$\sum_{i=1}^n X_i(t) = \|N\|. \quad (1)$$

Величины $X_i(t)$ являются случайными функциями времени, математические ожидания которых подчиняются следующей системе дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{dm_2}{dt} &= \lambda_{1,2}m_1 - (\lambda_{2,3} + \lambda_{2,4} + \lambda_{2,5} + \lambda_{2,6})m_2 + \lambda_{3,2}m_3 + \lambda_{4,2}m_4 + \lambda_{5,2}m_5; \\ \frac{dm_3}{dt} &= \lambda_{2,3}m_2 - \lambda_{3,2}m_3; \\ \frac{dm_4}{dt} &= \lambda_{2,4}m_2 - (\lambda_{4,2} + \lambda_{4,5})m_4; \\ \frac{dm_5}{dt} &= \lambda_{2,5}m_2 + \lambda_{4,5}m_4 - \lambda_{5,2}m_5; \\ m_1 &= \text{const}, m_6 = \text{const}. \end{aligned} \quad (2)$$

На основе данной системы уравнений может быть определено среднее число объектов в парке, находящихся в различных состояниях.

Данная информация может быть использована при планировании производственной и инвестиционной стратегий предприятия, а также определении характеристик системы технического обслуживания и ремонта основных средств.

Рассмотрим далее применение предложенной модели к решению задачи оптимизации финансирования развития парка основных средств холдинговой структуры.

Модель оптимизации финансирования развития парка основных средств

Представленная модель – это техническое описание процесса развития парка основных средств, основанное на изменении его физических характеристик.

В то же время значительное влияние на принимаемые производственные и инвестиционные решения оказывают финансово-экономические и социальные характеристики среды, в которой предприятие ведет свою деятельность [12–15]. Для учета их влияния описанная в предыдущем разделе модель должна быть дополнена описанием экономической деятельности предприятия.

Для этого свяжем с рассматриваемым парком основных средств денежный поток $\{X_t\}_{t=0, \dots, T}$, выделяемый на финансирование обслуживания, ремонтов и модернизации.

Разобьем данный денежный поток по статьям, соответствующим расходам на ремонты $\{X_t^0\}$ и модернизацию $\{X_t^1\}$ существующих объектов, а также закупки новых объектов $\{X_t^2\}$:

$$X_t = X_t^0 + X_t^1 + X_t^2. \quad (3)$$

В этом случае интенсивности переходов между состояниями в системе становятся зависящими от объемов финансирования, выделяемых по разным статьям (X_t^0, X_t^1, X_t^2):

$$\begin{aligned} \lambda_{1,2}(t) &= G_{1,2}(t, X_1^2, \dots, X_{t-1}^2); \\ \lambda_{3,2}(t) &= G_{3,2}(t, X_1^0, \dots, X_{t-1}^0); \\ \lambda_{2,5}(t) &= G_{2,5}(t, X_1^1, \dots, X_{t-1}^1); \\ \lambda_{4,5}(t) &= G_{4,5}(t, X_1^1, \dots, X_{t-1}^1). \end{aligned} \quad (4)$$

Будем предполагать, что финансирование, выделяемое по всем статьям, осваивается в текущем периоде. Тогда все функции G_{ij} будут зависеть только от величин ($X_{t-1}^0, X_{t-1}^1, X_{t-1}^2$).

С учетом этого уравнения системы (2) запишутся в форме

$$\begin{aligned} \frac{dm_2}{dt} &= G_{1,2}(t, X_{t-1}^2)m_1 - (\lambda_{2,3} + \lambda_{2,4} + \lambda_{2,5} + \lambda_{2,6})m_2 + \\ &+ G_{3,2}(t, X_{t-1}^0)m_3 + \lambda_{4,2}m_4 + \lambda_{5,2}m_5; \\ \frac{dm_3}{dt} &= \lambda_{2,3}m_2 - G_{3,2}(t, X_{t-1}^0)m_3; \\ \frac{dm_4}{dt} &= \lambda_{2,4}m_2 - (\lambda_{4,2} + G_{4,5}(t, X_{t-1}^1))m_4; \\ \frac{dm_5}{dt} &= G_{2,5}(t, X_{t-1}^1)m_2 + G_{4,5}(t, X_{t-1}^1)m_4 - \lambda_{5,2}m_5. \end{aligned} \quad (5)$$

Динамическая система, описываемая уравнениями (5), является управляемой. Выбор стратегий финансирования ремонтов, модернизации и закупок новых объектов приводит к изменению интенсивностей перехода, следовательно, и распределения объектов парка основных средств по состояниям.

Так как правые части уравнений (5) содержат слагаемые, явно зависящие от времени, рассматриваемая система является нестационарной. В связи с этим аналитическое

нахождение траектории состояний парка в общем случае представляется невозможным. Практическое решение данной задачи может быть получено с использованием численных методов.

Зависимость траектории состояний парка основных средств от объемов финансирования закупок, ремонтов и модернизации, дает возможность свести задачу управления парком к рассмотрению инвестиционных проектов специальной структуры.

Классический анализ инвестиционных проектов рассматривает экономические системы, ориентированные на извлечение прибыли. В соответствии с этим задача анализа заключается в сравнении затрат на реализацию проекта и получаемых от него доходов.

Широко используемым на практике критерием эффективности инвестиционных проектов является показатель текущей приведенной стоимости NPV , представляющий собой дисконтированную величину приносимой им чистой прибыли³:

$$NPV = \sum_{t=0}^T \beta^t (\Pi_t - X_t), \quad (6)$$

где $\{\Pi_t\}$, $\{X_t\}$ – потоки доходов и затрат соответственно, возникающих при реализации проекта;

β – коэффициент дисконтирования, описывающий межвременное изменение стоимости доходов и затрат;

T – длительность периода планирования.

С учетом данного показателя задача оптимизации инвестиционного проекта может быть представлена в виде

$$NPV(a) \rightarrow \max_{a \in A}, \quad (7)$$

где A – множество управляемых параметров инвестиционных проектов.

С точки зрения определенных целевых установок использование показателя NPV не полностью отражает эффективность управления парком основных средств.

В связи с этим стандартная постановка задачи оптимизации инвестиционного проекта должна быть дополнена для отражения специфики решаемой задачи. Для этого может быть использован аппарат многокритериальных задач принятия решений [16].

³ Виленский П.Л., Лившиц В.Н., Смоляк С.А. Оценка эффективности инвестиционных проектов. Теория и практика. М.: ПолиПринт Сервис, 2015. 1300 с.

Одним из основных показателей, определяющих эффективность эксплуатации парка основных средств предприятия, является их надежность, которая в свою очередь определяется ресурсом и сроком службы [17, 18]. Данный показатель изменяется в процессе эксплуатации объектов основных средств, в связи с чем важной задачей является его поддержание на должном уровне в течение всех этапов жизненного цикла парка.

Рассмотрим показатель надежности парка основных средств в качестве дополнительного критерия оптимизации режима финансирования парка:

$$W = W(R), \quad (8)$$

где R – количество объектов основных средств, используемых в производственном процессе.

Данная величина зависит от объема финансирования, выделенного на их закупку, ремонты и модернизацию

$$R_t = F_t(X_0, \dots, X_{t-1}), \quad (9)$$

где отображение $F_t(\cdot)$ определяется динамическим процессом, заданным системой (5).

Определение оптимального режима финансирования развития парка основных средств в этом случае представляется как многокритериальная задача:

$$V(X) = \sum_{t=0}^T \beta^t X_t \rightarrow \min, \quad (10)$$

$$C(R) = \min\{W(R_0), \dots, W(R_T)\} \rightarrow \max \quad (11)$$

при условиях (9).

Дисконтированный денежный поток (10) в данной задаче минимизируется в связи с тем, что он включает в себя только расходы на развитие и обслуживание парка. Дополнительно вводится критерий эффективности (11), определяемый как минимальный уровень надежности, обеспечиваемой парком основных средств, в течение рассматриваемого планового периода.

Будем предполагать, что W монотонно возрастает по числу исправных объектов в парке. Тогда критерий (11) может быть приведен к более простому виду

$$C'(R) = \min\{R_0, \dots, R_T\} \rightarrow \max. \quad (12)$$

Особенностью рассматриваемой задачи является то, что критерий надежности не может быть измерен в денежном выражении, что не дает возможности свести ее к стандартной задаче математического программирования.

В связи с этим для нахождения оптимального режима финансирования парка основных средств целесообразно использовать принципы оптимальности для многокритериальных задач.

Принципом, широко используемым при решении многокритериальных задач, является Парето-оптимальность [19, 20]. Для приведенной ранее задачи оптимальность режима финансирования по Парето может быть сформулирована следующим образом: режим финансирования развития парка $X = \{X_t\}$ является Парето-оптимальным, если отсутствует другой допустимый режим финансирования $X' = \{X'_t\}$, такой, что выполнены условия:

$$V(X) \geq V(X'), C(R) \leq C(R'),$$

и хотя бы одно из них – строгое.

Экономический смысл Парето-оптимальности режима развития парка основных средств заключается в том, что на допустимом множестве отсутствует другой режим, обеспечивающий более высокие значения показателя надежности (11) при не большей, чем в текущем режиме, величине дисконтированных затрат (10).

Множество допустимых режимов финансирования в данной задаче формируется исходя из предъявляемых требований к уровню надежности функционирования парка и объему затрат.

Первое из них говорит о том, что на любом допустимом режиме финансирования доля функционирующих объектов в парке должна быть не меньше некоторого заданного уровня:

$$C(R) \geq C_0. \quad (13)$$

Второе представляет собой бюджетное ограничение, определяющее максимальный уровень расходов на развитие парка:

$$V(X) \leq V_0, \quad (14)$$

Из экономического смысла параметров следует, что данные ограничения противоречат друг другу: большее количество функционирующих объектов в составе парка может быть обеспечено только за счет увеличения объема расходов. Следовательно, множество допустимых режимов финансирования в данной задаче будет ограниченным (возможно, пустым).

Таким образом, определение оптимальной стратегии финансирования развития парка основных средств представляет собой определение режима X , удовлетворяющего условию Парето-оптимальности и такого, что соответствующие величины $C(R)$ и $V(X)$ удовлетворяют ограничениям допустимости (13)–(14).

Применим для решения данной задачи метод ограничений. Он заключается в сведении многокритериальной задачи к однокритериальной задаче математического программирования путем выбора одного из критериев в качестве главного и дальнейшей его оптимизации при условии, что другие критерии принимают значения, находящиеся во множестве приемлемых для лица, принимающего решения. Известно, что решения задач оптимизации, получаемые данным методом, являются Парето-оптимальными в исходной многокритериальной задаче [21].

В качестве основного будем использовать критерий (11), представляющий собой надежность системы, тогда как финансовая эффективность (10) будет играть роль ограничения на располагаемые ресурсы. В этом случае рассматриваемая задача сведется к однокритериальной задаче оптимизации функции (12) при ограничениях (5), описывающих жизненный цикл парка, а также бюджетном ограничении (14).

Оптимальный режим финансирования парка основных средств

Рассмотрим в качестве примера задачу оптимизации режима развития парка основных средств производственной системы с заданными характеристиками.

В качестве базовой рассмотрим ситуацию, когда интенсивности поступления средств из ремонтов определяются их техническими особенностями и не зависят от выделенного финансирования. Решение данной задачи будем искать в классе стационарных режимов функционирования парка, в которых его количественный состав остается постоянным во времени. Результаты моделирования представлены на *рис. 2*. Видно, что при заданных интенсивностях перехода и начальных условиях количество исправных объектов основных средств в парке стабилизируется на уровне $C^0 \approx 200$ ед.

На графиках, приведенных на *рис. 3*, представлен пример расчета оптимального режима развития парка основных средств предприятия на горизонте планирования $T = 3$ года при наличии бюджетного ограничения (14) на объем финансирования программы ремонтов и модернизации. Видно, что финансирование в этом случае будет описываться пороговой функцией:

$$X = \begin{cases} 0, & t < t_0; \\ X_{\max}, & t \geq t_0, \end{cases}$$

где момент переключения $t_0 = 13\,600$ ч (примерно 1,5 года).

В результате этого в течение первой половины планового периода устанавливается переходный режим, на котором количество исправных основных средств в парке снижается в связи с их износом.

Далее финансирование поступления объектов в систему осуществляется с постоянной интенсивностью $X_{\max}$, такой, что количество исправных объектов на протяжении данного периода остается практически неизменным.

Использование данной стратегии финансирования приводит к тому, что минимальное количество исправных основных средств в течение рассматриваемого периода (11) составит $C^* = 39,5$.

Это значение является максимально достижимым уровнем надежности рассматриваемого парка при заданном бюджетном ограничении.

При наличии дополнительных ограничений на количество функционирующих объектов в системе могут возникать дополнительные участки с переходными режимами. Так, на *рис. 4* представлена динамика числа исправных и ремонтируемых объектов для случая, когда предъявляются дополнительные требования к количеству исправных объектов по состоянию на конец планового периода.

При этом режим финансирования будет являться возрастающей функцией, предполагающей наличие участка «форсированного» финансирования развития парка и, соответственно, переходного режима в конце интервала планирования.

Наличие в задаче бюджетного ограничения приводит к недофинансированию развития парка в предшествующий период и, соответственно, снижению минимального количества исправных объектов основных средств. В результате этого значение критерия эффективности на данном режиме уменьшается: $C_{\min} = 32,04$.

Таким образом, в классе стационарных режимов функционирования рассматриваемой системы оптимальные стратегии финансирования имеют кусочно-постоянный вид, при котором финансирование развития парка производится на заключительном этапе планового периода. Момент переключения и интенсивность финансирования выбираются из условия достижения максимально возможного количества исправных объектов основных средств на всем протяжении траектории.

При наличии краевых условий возникают участки нестационарных режимов, которые приводят к снижению показателя эффективности.

Заключение

Цифровая трансформация промышленных предприятий приводит к необходимости разработки инструментария, обеспечивающего гибкое управление производственными активами предприятий и их систем в режиме реального времени. Особенностью использования таких инструментов является необходимость учета разнородной информации, отражающей как технические аспекты состояния парка основных средств, так и экономические характеристики хозяйственной деятельности предприятия.

Нами сформулирован математический аппарат, позволяющий моделировать жизненный цикл объектов парков основных средств, на основе которого может решаться ряд задач как стратегического уровня, по определению режима финансирования их развития, так и текущего операционного уровня, связанных с оптимизацией загрузки.

Особенностью разработанного аппарата является учет наряду с экономическими факторами технических аспектов управления парками основных средств, что дает возможность повышения надежности их работы.

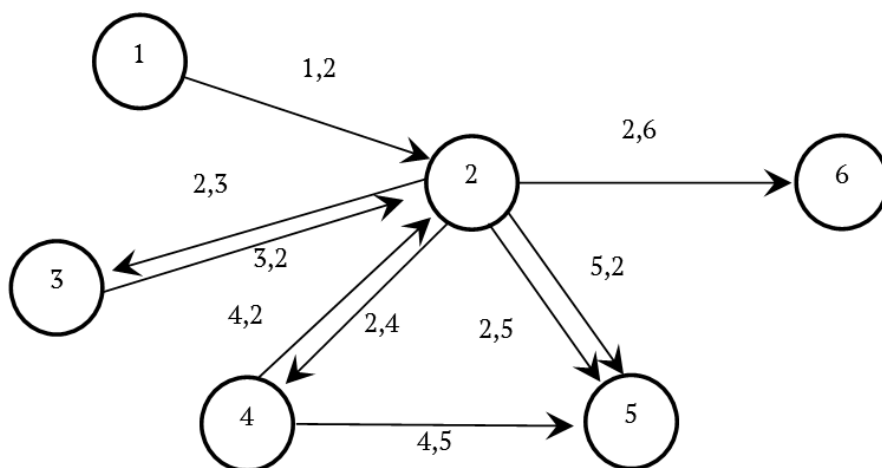
Для задачи выбора режима финансирования развития парка основных средств охарактеризована оптимальная стратегия, заключающаяся в обеспечении стационарного режима с постоянным во времени количеством функционирующих объектов. Показано, что наличие краевых условий при фиксированном бюджетном ограничении приводит в общем случае к снижению уровня надежности на оптимальном решении.

Рисунок 1

Граф состояний объекта основных средств

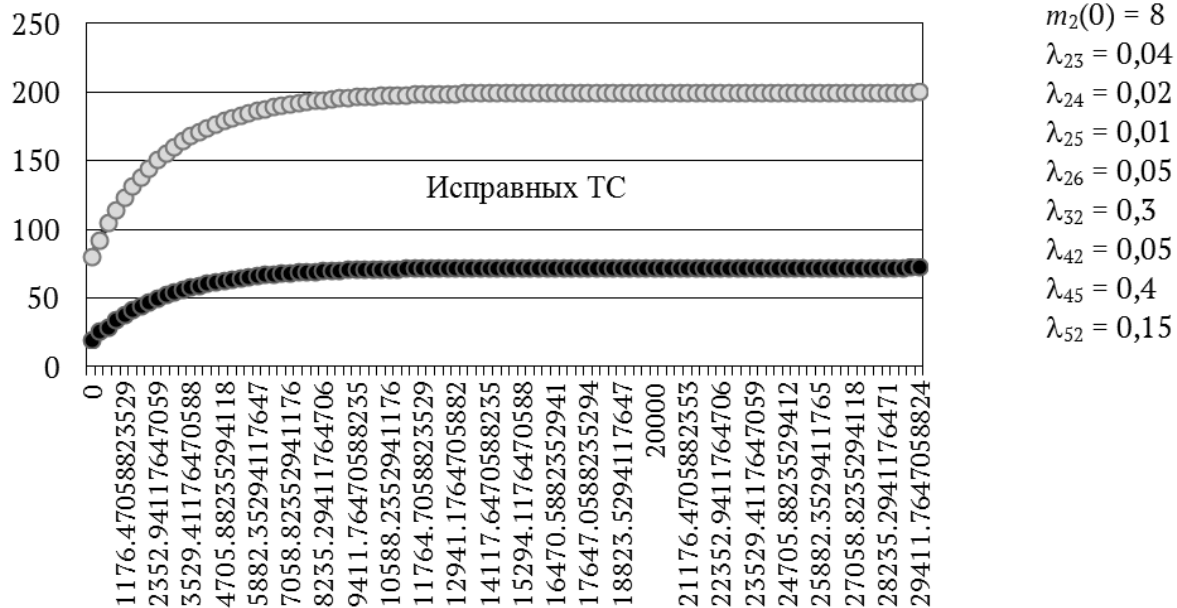
Figure 1

A state graph of fixed assets item



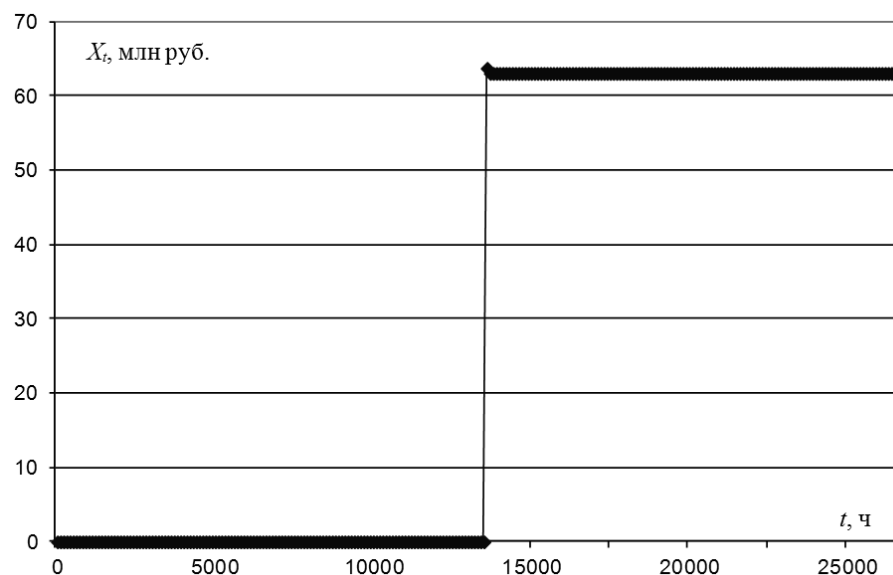
Источник: авторская разработка

Source: Authoring

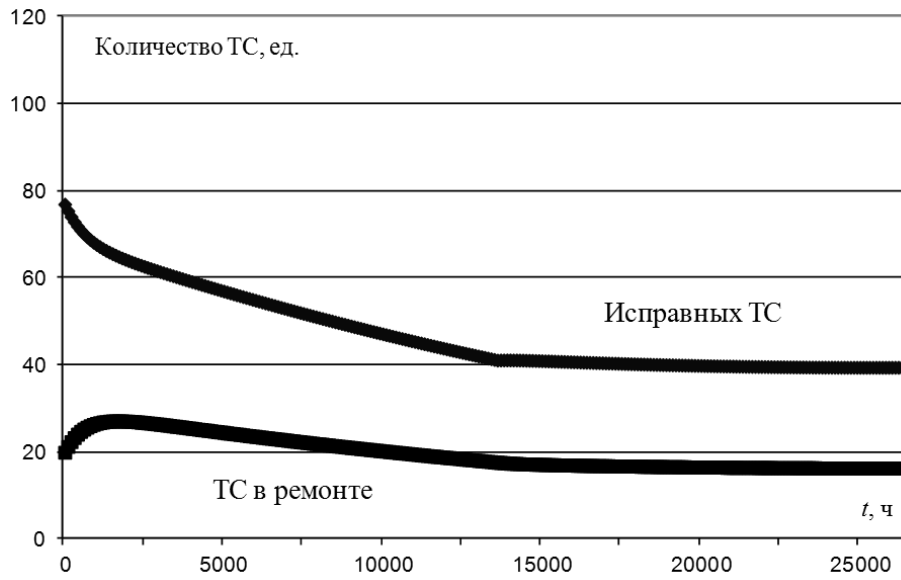
Рисунок 2**Динамика парка основных средств без финансовых ограничений****Figure 2****Changes in fixed assets without financial constraints**

Источник: авторская разработка

Source: Authoring

Рисунок 3**Оптимальный режим развития парка основных средств при финансовых ограничениях:****a – режим финансирования; b – количество объектов в парке****Figure 3****An optimal mode of fixed assets development under financial constraints:****a – mode of financing; b – number of items of fixed assets**

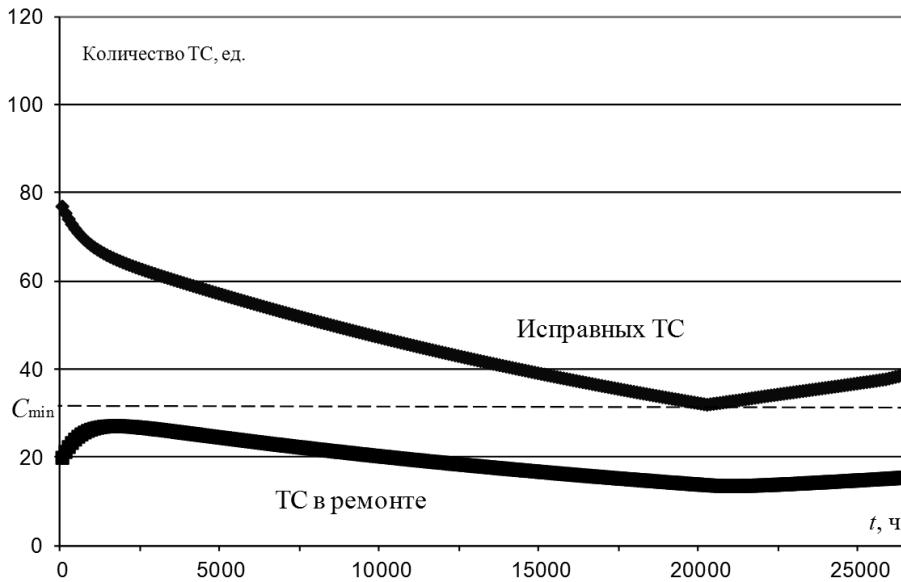
a



b

Источник: авторская разработка

Source: Authoring

Рисунок 4**Динамика числа объектов в парке при наличии краевого условия****Figure 4****Changes in the number of items of fixed assets subject to the existence of boundary condition**

Источник: авторская разработка

Source: Authoring

Список литературы

1. Майоров В.А., Соколова И.С. Современные проблемы цифровизации промышленных предприятий в России // Экономические исследования и разработки. 2019. № 9. С. 37–46. URL: <http://edrf.ru/article/03-09-19>
2. Волков В.И., Голубев С.С., Щербаков А.Г. Цифровая трансформация как новый формат инновационно-технологической политики, реализуемой на предприятиях ОПК // Научный вестник оборонно-промышленного комплекса России. 2018. № 3. С. 22–31. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovaya-transformatsiya-kak-novyy-format-innovatsionno-tehnologicheskoy-politiki-realizuemoy-na-predpriyatiyah-opk>
3. Уринцов А.И., Староверова О.В. Инструментальные средства адаптации хозяйствующих субъектов к цифровой экономике: монография. М.: Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова, 2019. 164 с.
4. Меркулина И.А. Структура экономического обоснования инвестиций в топливно-энергетические компании // Экономика и управление в машиностроении. 2018. № 4. С. 27–29.
5. Титов В.В., Безмельницын Д.А. Промышленный кластер как основа платформы оптимизации стратегического управления развитием высокотехнологичного бизнеса // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Экономические науки. 2018. Т. 11. № 4. С. 230–241. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/promyshlennyy-klaster-kak-osnova-platformy-optimizatsii-strategicheskogo-upravleniya-razvitiem-vysokotekhnologichnogo-biznesa>
6. Туякова З.С., Черемушников Т.В. Особенности учета и оценки основных средств на различных этапах их жизненного цикла в соответствии с требованиями МСФО // Международный бухгалтерский учет. 2015. № 38. С. 2–23. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-ucheta-i-otsenki-osnovnyh-sredstv-na-razlichnyh-etapah-ih-zhiznennogo-tsikla-v-sootvetstvii-s-trebovaniyami-msfo/viewer>
7. Tinga T., Janssen R. The Interplay Between Deployment and Optimal Maintenance Intervals for Complex Multi-Component Systems. *Journal of Risk and Reliability*, 2013, vol. 227, iss. 3, pp. 227–240. URL: <https://doi.org/10.1177/1748006X13480743>
8. Швец Н.Н. Реализация стратегии импортозамещения в контексте обеспечения энергетической безопасности России // Вестник Академии военных наук. 2016. № 2. С. 139–144.

9. Бенди́ков М.А. Государственно-частное партнерство как механизм развития инновационной инфраструктуры // Аудит и финансовый анализ. 2016. № 1. С. 357–366.
10. Уринцов А.И., Староверова О.В., Галахов Д.В. Некоторые вопросы формирования условий развития современной цифровой экономики // Образование. Наука. Научные кадры. 2017. № 2. С. 108–111.
11. Петро́ченко А.Б., Бочкарев С.В., Ромодин А.В., Елтышев Д.К. Планирование процесса эксплуатации электротехнического оборудования с использованием теории марковских процессов // Электротехника. 2011. № 11. С. 20–24.
URL: https://www.booksite.ru/elektroteh/2011/2011_11.pdf
12. Полесский С.Н., Паньковский Б.Е. Методика расчета показателей достаточности системы ЗИП электронных средств // Системы управления, связи и безопасности. 2018. № 4. С. 35–47.
URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-rascheta-pokazateley-dostatochnosti-sistemy-zip-elektronnyh-sredstv>
13. Безделов С.А. Финансовая цифровизация для стимулирования регионального развития и смягчения санкционных рисков // Федерализм. 2018. № 2. С. 129–140.
URL: <https://federalizm.rea.ru/jour/article/view/99>
14. Кушнарев Л.И., Алешин В.Ф. К повышению эффективности государственной поддержки предприятий машиностроения // Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация. 2016. № 3. С. 1–8.
URL: <https://doi.org/10.7463/aplts.0316.0843844>
15. Дубровский В.Ж., Иванова Е.М., Чупракова Н.В. Проблемы оценки эффективности деятельности предприятий ОПК // Journal of New Economy. 2019. Т. 20. № 5. С. 92–107.
URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/problemy-otsenki-effektivnosti-deyatelnosti-predpriyatiy-opk>
16. Бармута К.А. Управление эффективным развитием промышленных предприятий на основе использования многоцелевого подхода к решению задач инвестиционного планирования // Гуманитарные и социально-экономические науки. 2016. № 2. С. 140–144.
17. Павлович В.Е., Рамзаев В.М. Экономические аспекты управления техническим состоянием основных средств предприятия // Вестник Самарского муниципального института управления. 2019. № 2. С. 90–95.
URL: https://www.imi-samara.ru/wp-content/uploads/2019/11/Pavlovich_Ramzaev_90-95.pdf

18. *Шибикин Д.Д.* К вопросу о технической эффективности инвестиционных проектов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер.: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2019. Т. 19. № 1. С. 101–113. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-o-tehnicheskoy-effektivnosti-investitsionnyh-proektov>
19. *Власов Д.А.* Методика количественного анализа при принятии решений в различных информационных условиях // Системные технологии. 2018. № 4. С. 18–29. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-kolichestvennogo-analiza-pri-prinyatii-resheniy-v-razlichnyh-informatsionnyh-usloviyah>
20. *Егорова Н.Е.* Применение эвристических процедур в задачах многоуровневого управления // Экономика и математические методы. 2017. Т. 53. № 2. С. 90–100. URL: <https://arxiv.gaugn.ru/s042473880000525-6-1-ru-3/>
21. *Новикова Н.М., Поспелова И.И., Зенюков А.И.* Метод сверток в многокритериальных задачах с неопределенностью // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2017. № 5. С. 27–45.

Информация о конфликте интересов

Мы, авторы данной статьи, со всей ответственностью заявляем о частичном и полном отсутствии фактического или потенциального конфликта интересов с какой бы то ни было третьей стороной, который может возникнуть вследствие публикации данной статьи. Настоящее заявление относится к проведению научной работы, сбору и обработке данных, написанию и подготовке статьи, принятию решения о публикации рукописи.

A MODEL TO OPTIMIZE THE STRUCTURE OF ENTERPRISE'S FIXED ASSETS IN CONDITIONS OF DIGITAL TRANSFORMATION

Georgii V. KOLESNIK ^{a,*},
Mikhail B. RYBAKOV ^b

^a Plekhanov Russian University of Economics (PRUE),
Moscow, Russian Federation
Kolesnik.GV@rea.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0695-5038>

^b AO Russian Helicopters,
Moscow, Russian Federation
rybakovmb@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-8924-0366>

* Corresponding author

Article history:

Article No. 482/2020
Received 25 August 2020
Received in revised form
20 September 2020
Accepted 22 October 2020
Available online
26 February 2021

JEL classification: D24,
L23

Keywords: fixed assets,
fleet, multicriteria
optimization, economic
efficiency, reliability

Abstract

Subject. The article addresses the enhancement of fixed assets utilization efficiency as one of priority tasks faced by modern machine-building enterprises.

Objectives. The purpose is to devise approaches and tools for solving the problems of optimization of industrial enterprises' fixed assets development and use, on the basis of mathematical modeling.

Methods. The study employs methods of mathematical modeling of economic processes, the Markov chain theory, and the multicriteria optimization.

Results. We offer an approach to analyze the life cycle of enterprise's fixed assets based on the theory of Markov chains. The paper presents a mathematical model of the fixed asset life cycle, formulates optimization tasks for fixed assets development, taking into account economic feasibility and reliability. Using the developed tools, it is possible to plan investing and operating activities for geographically distributed systems of enterprises, in particular, optimization of investment in production capacities development, planning their maintenance and repairs, load distribution between individual enterprises of the system.

Conclusions. The use of modern digital technologies that provide dynamic forecasting and optimization of fixed assets enables to achieve a number of improvements, including a reduction in production time and cost and increase in efficiently used production means.

© Publishing house FINANCE and CREDIT, 2020

Please cite this article as: Kolesnik G.V., Rybakov M.B. A Model to Optimize the Structure of Enterprise's Fixed Assets in Conditions of Digital Transformation. *Economic Analysis: Theory and Practice*, 2021, vol. 20, iss. 2, pp. 357–378.
<https://doi.org/10.24891/ea.20.2.357>

References

1. Maiorov V.A., Sokolova I.S. [Modern problems of digitalization of industrial enterprises in Russia]. *Ekonomicheskie issledovaniya i razrabotki = Economic Development*, 2019, no. 9, pp. 37–46. URL: <http://edrf.ru/article/03-09-19> (In Russ.)
2. Volkov V.I., Golubev S.S., Shcherbakov A.G. [Digital transformation as a new format of innovation and technology policy implemented at defence industry enterprises]. *Nauchnyi vestnik oboronno-promyshlennogo kompleksa Rossii = Scientific Bulletin of the Military-Industrial Complex of Russia*, 2018, no. 3, pp. 22–31. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovaya-transformatsiya-kak-novyy-format-innovatsionno-tehnologicheskoy-politiki-realizuemoy-na-predpriyatiyah-opk> (In Russ.)
3. Urintsov A.I., Staroverova O.V. *Instrumental'nye sredstva adaptatsii khozyaistvuyushchikh sub"ektov k tsifrovoi ekonomike: monografiya* [Tools for adaptation of economic entities to the digital economy: a monograph]. Moscow, Plekhanov Russian University of Economics Publ., 2019, 164 p.
4. Merkulina I.A. [Structure of Investments' Economic Justification in Fuel and Energy Companies]. *Ekonomika i upravlenie v mashinostroenii*, 2018, no. 4, pp. 27–29. (In Russ.)
5. Titov V.V., Bezmel'nitsyn D.A. [Industrial cluster as the platform of optimization for strategic management of development of high-tech business]. *Nauchno-tekhнические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Ekonomicheskie nauki = Saint-Petersburg State Polytechnic University Journal. Economics*, 2018, vol. 11, no. 4, pp. 230–241. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/promyshlennyy-klaster-kak-osnova-platformy-optimizatsii-strategicheskogo-upravleniya-razvitiem-vysokotekhnologichnogo-biznesa> (In Russ.)
6. Tuyakova Z.S., Cheremushnikova T.V. [Specifics of fixed assets accounting and valuation at various stages of life cycle under IFRS requirements]. *Mezhdunarodnyi bukhgalterskii uchët = International Accounting*, 2015, no. 38, pp. 2–23. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-ucheta-i-otsenki-osnovnyh-sredstv-na-razlichnyh-etapah-ih-zhiznennogo-tsikla-v-sootvetstvii-s-trebovaniyami-msfo/viewer> (In Russ.)
7. Tinga T., Janssen R. The Interplay Between Deployment and Optimal Maintenance Intervals for Complex Multi-Component Systems. *Journal of Risk and Reliability*, 2013, vol. 227, iss. 3, pp. 227–240. URL: <https://doi.org/10.1177/1748006X13480743>

8. Shvets N.N. [The implementation of the import substitution strategy in the context of ensuring energy security of Russia]. *Vestnik Akademii voennykh nauk = Bulletin of the Academy of Military Sciences*, 2016, no. 2, pp. 139–144. (In Russ.)
9. Bendikov M.A. [Public-private partnerships as a mechanism for the development of innovation infrastructure]. *Audit i finansovyi analiz = Audit and Financial Analysis*, 2016, no. 1, pp. 357–366. (In Russ.)
10. Urintsov A.I., Staroverova O.V., Galakhov D.V. [Some issues of formation of conditions for the development of modern digital economy]. *Obrazovanie. Nauka. Nauchnye kadry*, 2017, no. 2, pp. 108–111. (In Russ.)
11. Petrochenkov A.B., Bochkarev S.V., Romodin A.V., Eltyshv D.K. [Planning of the electrotechnical equipment operational process with use of Markovian processes theory]. *Elektrotehnika*, 2011, no. 11, pp. 20–24.
URL: https://www.booksite.ru/elektroteh/2011/2011_11.pdf (In Russ.)
12. Polesskii S.N., Pan'kovskii B.E. [Calculating Method of Determination Factors for Spare Parts System of the Electronic Means]. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti = Systems of Control, Communication and Security*, 2018, no. 4, pp. 35–47. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-rascheta-pokazateley-dostatochnosti-sistemy-zip-elektronnyh-sredstv> (In Russ.)
13. Bezdelov S.A. [Financial digitalization for the stimulation of regional development and the neutralization of sanitations' risks]. *Federalizm = Federalism*, 2018, no. 2, pp. 129–140. URL: <https://federalizm.rea.ru/jour/article/view/99> (In Russ.)
14. Kushnarev L.I., Aleshin V.F. [Towards Increasing State Support Efficiency of Mechanical Engineering Plants]. *Mashiny i ustanovki: proektirovanie, razrabotka i ekspluatatsiya = Machines and Plants: Design and Exploiting*, 2016, no. 3, pp. 1–8. (In Russ.) URL: <https://doi.org/10.7463/aplts.0316.0843844>
15. Dubrovskii V.Zh., Ivanova E.M., Chuprakova N.V. [Problems of assessing defence contractors' efficiency]. *Journal of New Economy*, 2019, vol. 20, no. 5, pp. 92–107. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/problemy-otsenki-effektivnosti-deyatelnosti-predpriyatiy-opk> (In Russ.)
16. Barmuta K.A. [Effective management of the development of industrial enterprises on the basis of using a multi-purpose approach to the solution of problems of investment planning]. *Gumanitarnye i sotsial'no-ekonomicheskie nauki = Humanities and Social-Economic Sciences*, 2016, no. 2, pp. 140–144. (In Russ.)
17. Pavlovich V.E., Ramzaev V.M. [Economic aspects of technical condition management of capital assets of an enterprise]. *Vestnik Samarskogo munitsipal'nogo instituta upravleniya = Bulletin of Samara Municipal Institute of Management*, 2019, no. 2,

- pp. 90–95. URL:
https://www.imi-samara.ru/wp-content/uploads/2019/11/Pavlovich_Ramzaev_90-95.pdf (In Russ.)
18. Shibikin D.D. [On the question of the technical effectiveness of investment projects]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Ser.: Komp'yuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika* = *Bulletin of the South Ural State University. Computer Technologies, Automatic Control & Radioelectronics*, 2019, vol. 19, no. 1, pp. 101–113. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-o-tehnicheskoy-effektivnosti-investitsionnyh-proektov> (In Russ.)
19. Vlasov D.A. [Technique of the quantitative analysis at decision-making in various information conditions]. *Sistemnye tekhnologii* = *System Technologies*, 2018, no. 4, pp. 18–29. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-kolichestvennogo-analiza-pri-prinyatii-resheniy-v-razlichnyh-informatsionnyh-usloviyah> (In Russ.)
20. Egorova N.E. [The use of heuristics procedures in the problems of multi-level governance]. *Ekonomika i matematicheskie metody* = *Economics and Mathematical Methods*, 2017, vol. 53, no. 2, pp. 90–100.
URL: <https://arxiv.gaugn.ru/s042473880000525-6-1-ru-3/> (In Russ.)
21. Novikova N.M., Pospelova I.I., Zenyukov A.I. [Method of convolution in multicriteria problems with uncertainty]. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Teoriya i sistemy upravleniya*, 2017, no. 5, pp. 27–45. (In Russ.)

Conflict-of-interest notification

We, the authors of this article, bindingly and explicitly declare of the partial and total lack of actual or potential conflict of interest with any other third party whatsoever, which may arise as a result of the publication of this article. This statement relates to the study, data collection and interpretation, writing and preparation of the article, and the decision to submit the manuscript for publication.