



О.Н. Пчельникова-Гротова
 Московский авиационный институт
 (Национальный исследовательский университет)

ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМЫ ФУНКЦИОНАЛЬНО-СТОИМОСТНОГО АНАЛИЗА ПРИ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА

В статье рассматриваются результаты исследования возможности применения функционального анализа при цифровизации производства, приведены состав и описание блоков разработанной автоматизированной системы функционально-стоимостного анализа объектов, рассмотрены вопросы подбора группы экспертов, работающих с системой. Результаты работы рассматриваемой системы продемонстрированы на примере построения функционально-идеальной модели объекта анализа и реализации решения по его модернизации.

Цифровая трансформация производства, функционально-стоимостной анализ, экспертная оценка, техническая система.

В условиях цифровой трансформации производство претерпевает революционные изменения, переходя от традиционных методов к интеграции цифровых инструментов и процессов. Это открывает новые возможности для оптимизации производственных операций, автоматизации задач, улучшения контроля и управления, а также создания инновационных продуктов и услуг.

Будучи активным методом поиска резервов экономики и предотвращения излишних затрат, функционально-стоимостной анализ (ФСА) на этапе цифровизации производства становится мощным инструментом при решении разнообразных задач – технических, организационных, управленческих, обеспечивает возможность анализа различных сценариев производства продукта и выбор лучшего из них, что позволяет сократить расходы, повысить эффективность производства и удовлетворенность клиентов [1–2].

Использование методологии ФСА для оптимизации различных аспектов производства, таких как управление запасами, производственный процесс и логистика, дает возможность выявить слабые места в

производственной цепочке и сделать необходимые улучшения.

Таким образом, ФСА может использоваться для определения того, какие процессы можно автоматизировать, какие данные нужно собирать и анализировать и какие инструменты и технологии лучше использовать для решения определенных задач при цифровой трансформации производства.

Согласно классификации Райница [3] типовой процесс цифровой трансформации производства содержит этапы оцифровки, цифровизации и цифровой трансформации (рис. 1).

Реализация цифровой трансформации предусматривает модернизацию существующих бизнес-процессов и принципов организации производства, а также разработку и внедрение новых процессов, в результате которых получается усовершенствованный продукт. Перед созданием цифрового двойника продукта необходимо методами ФСА провести его оптимизацию, и процесс цифровизации в этом случае примет вид, показанный на рисунке 2.

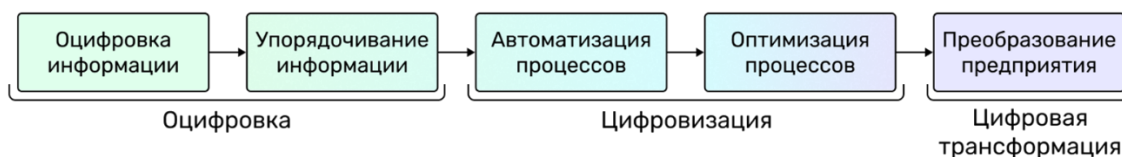


Рис. 1. Типовой процесс цифровизации производства

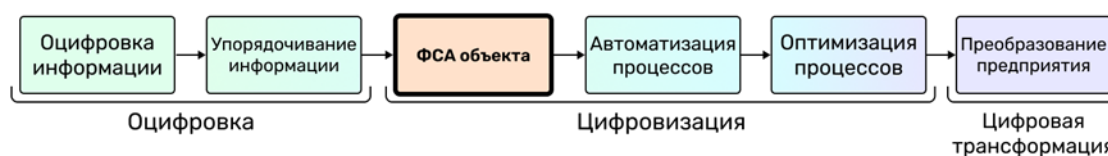


Рис. 2. Место ФСА в процессе цифровизации производства

**Сравнительные характеристики автоматизированных систем,
имеющих блоки ФСА**

Критерий сравнения	Автоматизированная система		
	AllFusion Process Modeler	ARIS Process Cost Analyzer	Hyperion Business Modeling
Метод моделирования	ABS/ABM	BPMN	BPMN
Назначение системы	Моделирование, анализ, документирование и оптимизация бизнес-процессов. Оценка стоимостных и временных характеристик бизнес-процессов.	Определение стоимости бизнес-процессов для стратегического управления предприятием.	Моделирование бизнес-процессов и планирования бизнес-стратегии. Анализ ресурсов, затрат и их носителей, объемов производства и др. информации.
Объект анализа	Бизнес-процессы	Бизнес-процессы и их затраты	Бизнес-процессы и их взаимосвязи с продуктами

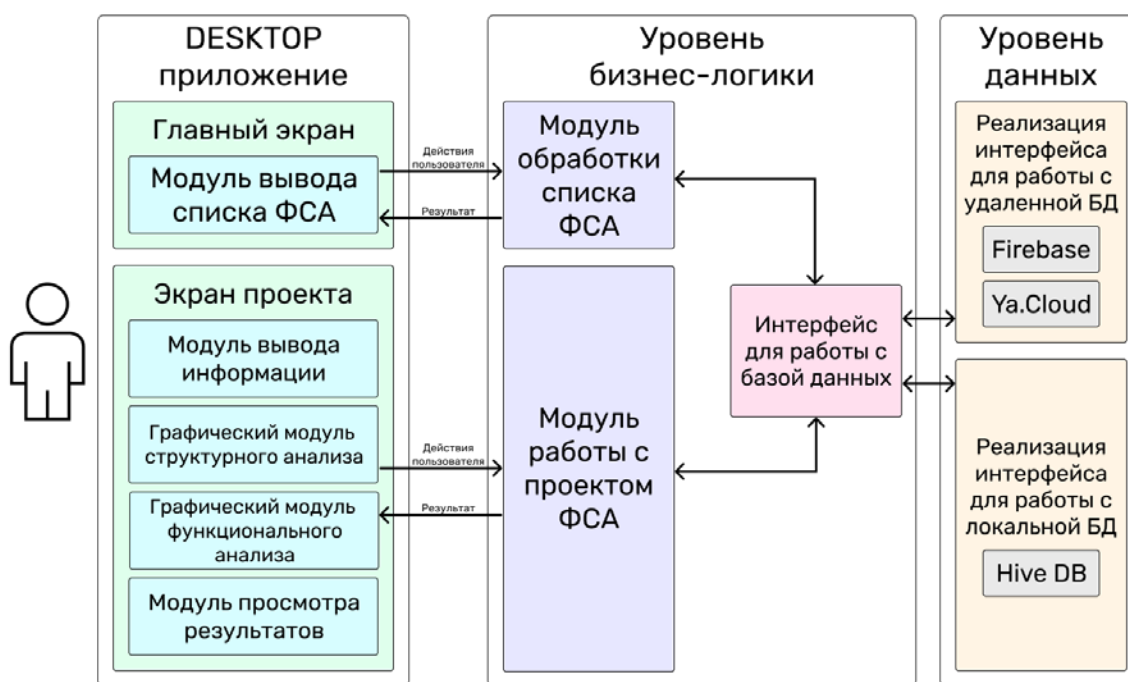


Рис. 3. Архитектура системы АС-ФСА

Современные автоматизированные системы моделирования и оптимизации бизнес-процессов, имеющие в своем составе блоки ФСА (табл. 1), в основном предполагают сокращение расходов на производство объекта анализа за счет снижения затрат на реализацию его функций и не рассматривают вопросы, связанные с оптимизацией числа функций и, следовательно, уменьшением количества элементов объекта. К недостаткам таких систем также можно отнести невозможность работы блоков ФСА в качестве отдельного модуля. Кроме того, в настоящее время доступность таких систем крайне ограничена.

Процесс проведения ФСА при цифровой трансформации производства можно разделить на следующие этапы:

1. Определение состава продукта и его функциональных характеристик (например, форма, размер, материал, функциональное назначение и взаимосвязь компонентов объекта анализа).
2. Анализ функциональных полей продукта с точки зрения их важности (значимости) в функционировании продукта, их взаимосвязей и требований к исполнению.
3. Анализ стоимостных полей продукта (затраты на производство компонентов и продукта в целом и другие экономические факторы).

4. Анализ возможных вариантов оптимизации (функционально-идеальное моделирование).

5. Разработка конечного продукта (реализация предложений по созданию функционально-идеальной модели).

Таким образом, ФСА может использоваться для определения того, какие процессы можно автоматизировать, какие данные нужно собирать и анализировать и какие инструменты и технологии лучше использовать для решения определенных задач в цифровой трансформации производства.

Разработанная автоматизированная система ФСА (АС-ФСА) представляет из себя desktop приложение и является многопользовательской (рис. 3). Локальное хранение реализуется с помощью NSQL HIVE, облачное хранилище (FireBase либо API Яндекс Диска).

В качестве объекта, подвергаемого анализу, в рассматриваемой системе используется понятие техническая система (ТС) [4], представляющая собой совокупность упорядоченно взаимодействующих частей (компонентов), обладающая свойствами, не сводящимися к свойствам отдельных элементов, и предназначенная для выполнения определенных полезных функций. Любая ТС обладает свойством эмерджент-

ности, т.е. имеет свойства или функции, не присущие ее отдельным компонентам.

Рассматриваемая АС-ФСА содержит ряд блоков (рис. 4), предназначенных для последовательного анализа ТС с целью ее совершенствования.

Система ФСА не исключает участие человека в своей работе, скорее наоборот, все ключевые решения остаются за группой экспертов, работающих с системой. Поэтому подбор участников экспертной рабочей группы возможен с учетом уровня их компетенций и подходов, повышающих достоверность получаемых оценок [5]:

$$K_{kj} = 0,5 \cdot (0,1 \cdot K_{ij} + K_{aj}),$$

где K_{kj} – коэффициент компетентности j -го специалиста по k -ой проблеме; K_{ij} – коэффициент информативности j -го специалиста по заданной проблеме ($K_{ij} = 0 \div 10$); K_{aj} – коэффициент аргументации j -го специалиста.

Коэффициенты информированности определяются самими экспертами путем самооценки по десятибалльной шкале, а коэффициент аргументации – путем суммирования баллов по эталонной таблице (табл. 2).

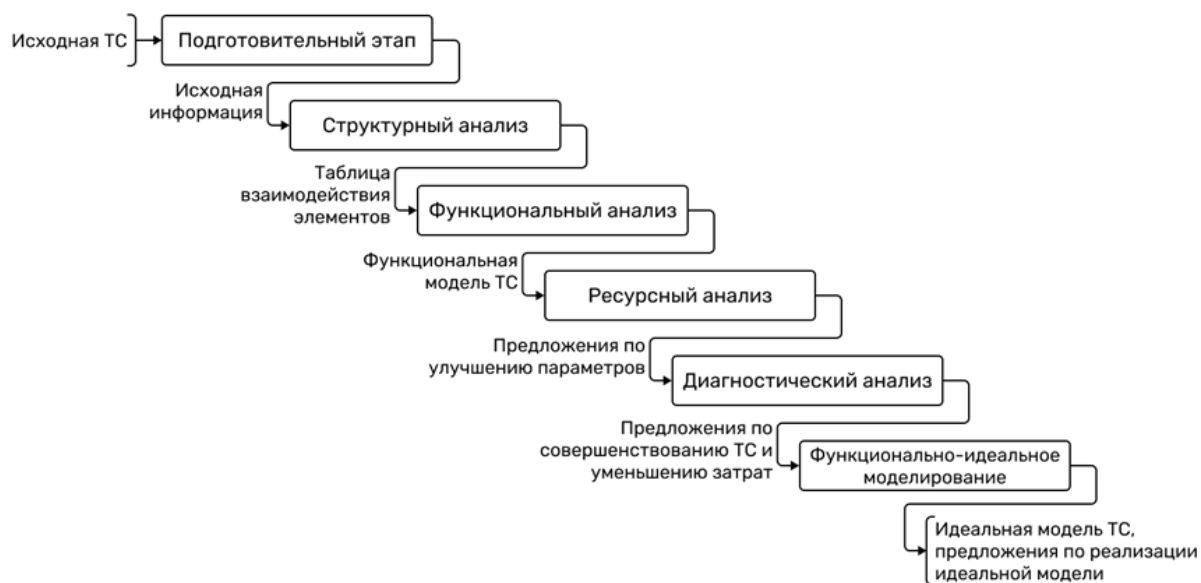


Рис. 4. Состав блоков системы ФСА

Таблица 2

Базовые значения коэффициента аргументации

№	Источник ориентации	Степень влияния источника на Ваше мнение			
		Высокая (В)	Средняя (С)	Низкая (Н)	Отсутствует (О)
1	Проведенный Вами теоретический анализ	0,3	0,2	0,1	0
2	Ваш практический опыт	0,5	0,4	0,2	0
3	Обобщение работ отечественных авторов	0,1	0,1	0,1	0
4	Обобщение работ зарубежных авторов	0,05	0,05	0,05	0
5	Ваша интуиция	0,05	0,05	0,05	0

Специалист по незаполненной таблице определяет, по каким градациям (В, С, Н или О) он оценивает для себя каждый источник. После чего таблица эксперта сравнивается с эталонной таблицей для определения суммы баллов, соответствующих оценкам этого эксперта. Полученное значение коэффициента компетентности может находиться в пределах от 0 до 1. К участию в исследованиях при прочих равных условиях привлекают специалистов с более высоким уровнем компетентности.

Для определения числа экспертов рабочей группы им предлагается принять участие в проведении экспертной оценки (например, определить возможность снижения себестоимости по объекту ФСА). После получения от экспертов количественной оценки, необходимая численность определяется по формуле:

$$m_k = \frac{c \cdot a_j - b}{a_j(1-c)},$$

где m_k – минимальное количество экспертов k го проекта; c – допустимая мера влияния суждений одного эксперта на групповую оценку; a_j – среднеарифметическая оценка, полученная от j -го участника; b – возможная оценка дополнительного ($m+1$)-го участника.

Каждый из перечисленных параметров вычисляется по приведенным ниже формулам.

Величина c определяется так, чтобы влияние мнения каждого эксперта на отклонение групповой оценки составляло 5–10 %.

$$c = \begin{cases} 1,05 - 1,1 & \text{при } b > a_j \\ 0,9 - 0,95 & \text{при } b < a_j \end{cases}$$

Среднеарифметическая оценка a_j каждого эксперта складывается из индивидуальных оценок экспертов

$$a_j = \frac{\sum_{i=1}^m a_i}{m_k}.$$

Значение b принимается равным оценке, имеющей максимальное отклонение от средней, т.е.

$$b = a_i, \text{ если } |a_i - a_m| = \max.$$

Таким образом, на подготовительном этапе выбирается объект анализа (ТС) и формируется группа экспертов.

Блок структурного анализа предназначен для построения компонентной и структурной моделей ТС, в которую вносится характеристика взаимосвязей всех

компонентов ТС в виде: «элементы А и В взаимодействуют друг с другом и при этом совершается ПОЛЕЗНОЕ ДЕЙСТВИЕ (Д) или возникает НЕЖЕЛАТЕЛЬНЫЙ ЭФФЕКТ (НЭ)».

На следующем этапе происходит построение функциональной модели ТС в виде причинно-следственных цепочек функций. При этом объекты рассматриваются с точки зрения выполняемых функций, абстрагируясь от их конструкции и технологии изготовления. Функции компонентов ТС ранжируются методом FAST [5], в зависимости от степени участия в выполнении главной функции объекта анализа.

Блоки ресурсного и диагностического анализа позволяют выявить недостаточные или избыточные ресурсы компонентов ТС и распределить их по группам приоритетов, определяющих порядок их исследования в следующем блоке.

Блок функционально-идеального моделирования предназначен для повышения идеальности ТС за счет эффективного выполнения необходимых функций объекта минимальным числом компонентов. Уменьшение количества элементов объекта анализа («свертывание» объекта) проводится тремя способами [4], путем удаления элементов-носителей «функций низкого ранга», а по возможности, и основных функций вместе с их функциями из исходной модели. Если функцию удалить нельзя, удаляют ее элемент-носитель, а саму функцию переносят на оставшиеся элементы ТС или элементы ее окружения. Элемент ТС, подлежащий удалению, выбирается либо автоматически, на основании ранжирования функций, либо экспертами по своему усмотрению. На основании рекомендаций по сокращению элементов ТС, выданных АС-ФСА, эксперты формулируют предложения по совершенствованию ТС путем реализации функционально-идеальной модели.

Проверка работоспособности разработанной системы проводилась на нескольких примерах (рис. 5).

Рассмотрим работу системы на примере анализа объекта – система управления лифтом (рис. 6). Экспертная рабочая группа состояла из 5 человек.

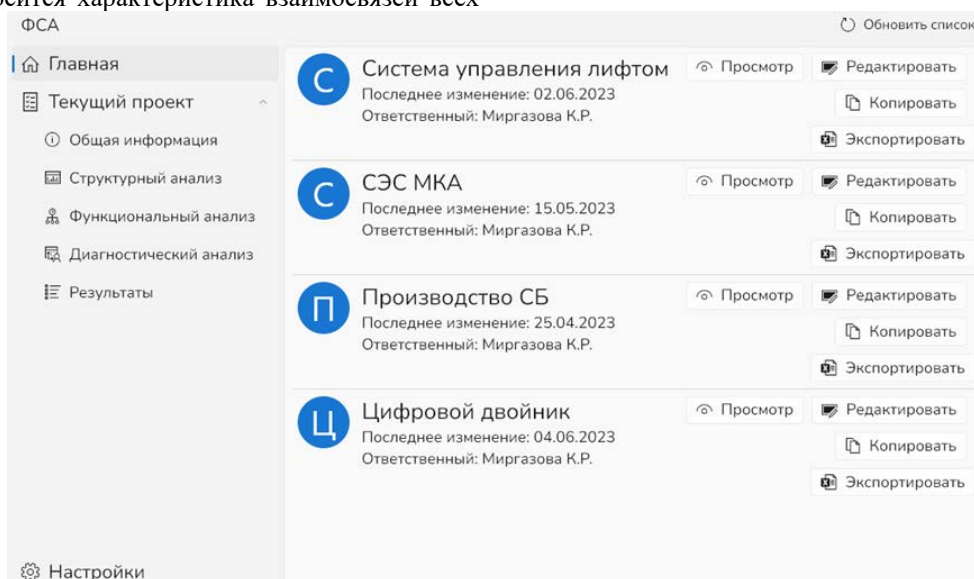


Рис. 5. Главное меню системы АС-ФСА

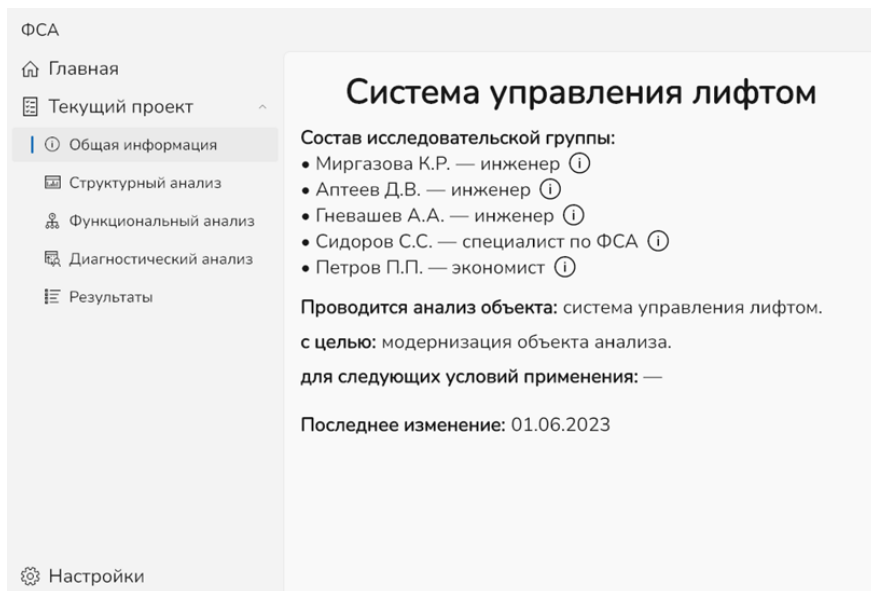


Рис. 6. Результат работы блока подготовки информации

Функционально-идеальное моделирование

Объект анализа и его функциональная модель станут идеальнее, если избавиться от выделенных элементов и функций:

Система управления лифтом	Управлять лифт	Г
Центральный процессор	Управлять лифт	О
Привод лифта	Передвигать лифт	О
Наладчик	Настраивать центральный процессор	В
Плата контроля	Уведомлять центральный процессор	В
Расширители портов	Расширять центральный процессор	В
Частотный преобразователь	Управлять привод лифта	В
Индикатор	Демонстрировать наладчик	Н
Драйвер индикатора	Управлять индикатор	2Н

[Далее](#)

Рис. 7. Результаты работы блока функционально-идеального моделирования

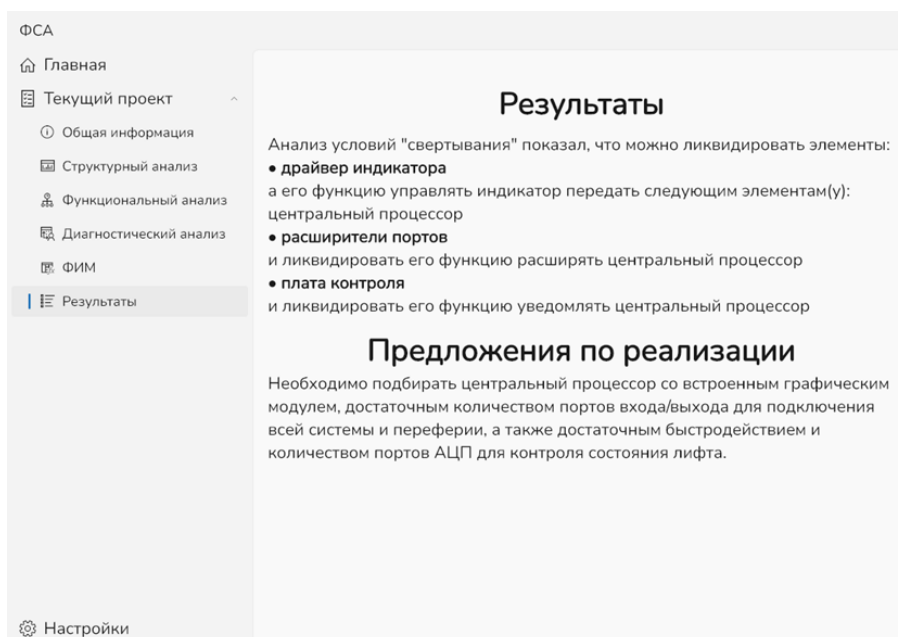


Рис. 8. Результаты анализа условий «свертывания» объекта анализа

Было проведено структурное и функциональное моделирование объекта, анализ ресурсов, диагностический анализ и функционально-идеальное моделирование, результаты которого показаны на рисунке 7.

Анализ условий «свертывания» позволил сформулировать предложения по совершенствованию конструкции лифта (рис. 8).

Таким образом, применение АС-ФСА при цифровой трансформации производства дает возможность совместной работы специалистов и экспертов из различных отраслей над модернизацией бизнес-процессов и объектов бизнеса, что особенно важно в условиях цифровой трансформации производства. Кроме того, рекомендации системы ФСА позволяют найти нестандартные варианты совершенствования технических систем.

В то же время правильное использование ФСА при цифровой трансформации производства требует соблюдения определенных условий. Анализ необходимо проводить в начале процесса цифровизации, чтобы смогли оценить текущую ситуацию и определить, какие изменения необходимо внести, чтобы обеспечить максимальную эффективность процессов. При трансформации производства следует использовать современные цифровые технологии и инструменты, которые позволяют собирать и обрабатывать необходимые данные для ФСА. Например, использование цифровых двойников и симуляционных моделей позволит получить более точную информацию о функциях системы и их взаимосвязи.

Соблюдение этих требований позволяет достичь наибольшей эффективности применения системы АС-ФСА.

Литература

1. Пчельникова-Гротова, О. Н. Методы и инструменты обеспечения качества промышленной продукции : учебное пособие / О. Н. Пчельникова-Гротова, С. В. Ванцов, О. В. Хомутская ; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). – Москва : Издательство МАИ, 2023. – 79 с.

2. Никитина, Е. Б. Функционально-стоимостный анализ : учебное пособие / Е. Б. Никитина. – Пермь, 2021. – 100 с. – URL: www.psu.ru/files/docs/science/books/uchebnie-posobiya/nikitinafunkcionalno-stoimostnyj-analiz.pdf (дата обращения: 12.08.2023). – Текст : электронный.

3. Shaping expert group digitalisation // Utwente – URL: <https://www.utwente.nl/en/organisation/about/shaping-2030/organisation/seg-digitalisation> (дата обращения: 12.08.2023). – Текст : электронный.

4. Пчельникова-Гротова, О. Н. Повышение качества продукции на основе системы функционально-стоимостного анализа / Пчельникова-Гротова, О. Н. // Надежность и качество сложных систем. – 2023. – № 1 (41). – С. 5–12.

5. Орлов, А. И. Организационно-экономическое моделирование. Учебник. В 3 частях. Часть 2. Экспертные оценки / А. И. Орлов. – Москва : МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2011. – 486 с.

O.N. Pchelnikova-Grotova

Moscow Aviation Institute (National Research University)

APPLICATION OF FUNCTIONAL-COST ANALYSIS SYSTEM IN PRODUCTION DIGITAL TRANSFORMATION

The article discusses the results of the study of the possibility of using functional analysis in the digitalization of production, provides the composition and description of the blocks of the developed automated system for functional-cost analysis of objects and considers the issues of selecting a group of experts working with the system. The results of the operation of the system under consideration are demonstrated by the example of constructing a functional-ideal model of the object of analysis and implementing a solution for its modernization.

Digital transformation of production, functional cost analysis, expert assessment, technical system.