УДК 658.512.4.07

ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОЦЕНКА СЛОЖНОСТИ ПРОЦЕССОВ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА НА ЭТАПЕ ПЛАНИРОВАНИЯ

© 2026 Т.И. Комаров

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург, Россия

Статья поступила в редакцию 22.01.2026

В статье предложена методика интегральной оценки сложности процессов подготовки производства на этапе планирования. Методика основана на использовании системы нормированных факторов, характеризующих трудоемкость работ, длительность выполнения, количество исполнителей, объем документов и согласований, уровень автоматизации, а также вероятность доработок и ошибок. На основе совокупности этих факторов и их весовых коэффициентов рассчитывается интегральный индекс сложности, позволяющий ранжировать этапы подготовки производства по уровням сложности. Применение методики показало, что в исследуемой системе значительная часть этапов относится к категориям, требующим повышенного управленческого внимания, координации и совершенствования организационно-информационного обеспечения. Практическая значимость методики заключается в возможности ее использования для раннего выявления проблемных этапов, обоснованного перераспределения ресурсов, снижения риска ошибок и доработок, а также повышения надежности и эффективности процессов подготовки производства.
Ключевые слова: подготовка производства, планирование, процессы подготовки производства, интегральная оценка сложности, этапы подготовки производства, индекс сложности, факторы сложности, автоматизация, документооборот, управленческие решения

DOI: 10.37313/1990-5378-2026-28-2(2)-386-392
EDN: CARWPN

Процессы подготовки производства на стадии планирования характеризуются высокой вариативностью, межфункциональной связанностью, значительным объемом информации и зависимостью от согласованности действий исполнителей, что обусловливает необходимость их предварительной количественной оценки. [1]

Научная новизна работы заключается в разработке методики интегральной оценки сложности реализации процессов подготовки производства на этапе планирования, основанной на комплексном учете трудовых, временных, организационных, информационных, технических и качественных факторов с последующим расчетом интегрального индекса сложности этапов. Предлагаемый подход позволяет уже на стадии планирования выявлять критические этапы, а значит появляется возможность заблаговременно спрогнозировать возможные задержки, доработки и несогласованность действий, обоснованно перераспределить ресурсы, определить приоритеты автоматизации и тем самым повысить надежность и результативность последующего выполнения работ.

С целью количественной диагностики состояния процессов ПП разработана методика оценки сложности, позволяющая на основе совокупности нормированных факторов определить интегральные индексы сложности процессов, этапов и всей системы планирования.

Пусть процесс подготовки производства состоит из n этапов (i=1,2,…,n_i = 1, 2, …, n_i=1,2,…,n), для каждого из которых оцениваются m факторов сложности (j=1,2,…,m_j = 1, 2, …, m_j=1,2,…,m). Каждый фактор X_{ij} характеризует частную сторону сложности – трудоемкость, длительность, уровень автоматизации, число исполнителей, количество согласований и т.д.

Для обеспечения сопоставимости показатели X'_{ij} нормируются в диапазоне [0; 1] по формуле (1).

$$X'_{ij} = \frac{X_{ij}}{\max(X_j)}. \quad (1)$$

Если увеличение значения фактора свидетельствует о снижении сложности (например, уровень автоматизации), используется обратное нормирование по формуле (2).

$$X'_{ij} = 1 - \frac{X_{ij}}{\max(X_j)}. \quad (2)$$

Каждому фактору присваивается весовой коэффициент w_j, отражающий степень его влияния на общую сложность. Сумма весов должна быть равна единице (3).

Комаров Тимофей Игоревич, аспирант кафедры инноватики и интегрированных систем качества.
E-mail: tim1kom@yandex.ru SPIN-код: 5009-3930

$$\sum_{j=1}^{m} w_j = 1. \quad (3)$$

Для каждого этапа *i* (i = 1…n) выделяются показатели, отражающие шесть аспектов сложности, приведенные в таблице 1.

Таблица 1 – Система факторов сложности этапов подготовки производства

№	Наименование фактора	Обозначение	Единицы измерения	Интерпретация показателя
1	Трудоемкость работ	(H_i)	чел·ч	Суммарные трудовые затраты по этапу
2	Длительность выполнения	(T_i)	ч	Продолжительность выполнения операций
3	Количество исполнителей	(S_i)	чел	Организационная сложность
4	Количество согласований и документов	(D_i)	ед.	Информационная нагрузка
5	Уровень автоматизации	(A_i)	%	Доля автоматизированных операций
6	Вероятность доработок и ошибок	(E_i)	коэфф.	Качественный риск повторных операций

Выбор системы факторов обусловлен необходимостью всесторонне охарактеризовать процесс подготовки производства (ППП) с позиции сложности, информационной связанности и технологической устойчивости. Анализ литературных источников [1-4], а также результаты исследования реальных производственных циклов показали, что сложность ППП определяется не отдельным параметром, а комплексом взаимосвязанных характеристик, отражающих трудовые, временные, организационные, информационные, технические и качественные аспекты.

Исходя из этого, в методике выделены шесть базовых факторов, обеспечивающих полноту и минимальную избыточность описания.

Трудоемкость работ (H_i) – это суммарные затраты рабочего времени на выполнение операций этапа. Фактор отражает ресурсную сложность процесса и его влияние на загрузку персонала и оборудования. Чем выше трудоемкость, тем больше вероятность отклонений от плановых сроков и тем выше сложность.

Длительность выполнения (T_i) – это календарное время, необходимое для завершения этапа. Длительные этапы повышают риск сбоев, потери актуальности данных и нарушений ритмичности. Фактор отражает временную инерционность и является ключевым параметром для расчета сложность цикла.

Количество исполнителей (S_i) – это число сотрудников или подразделений, участвующих в этапе. Фактор характеризует организационную сложность и потребность в координации. Рост числа участников увеличивает вероятность ошибок взаимодействия и требует дополнительных механизмов управления.

Количество документов и согласований (D_i) – это количество технических, плановых и конструкторско-технологических документов, а также стадий их согласования. Отражает информационную сложность – чем больше документов и согласующих лиц, тем выше вероятность задержек и несогласованности данных.

Уровень автоматизации (A_i) – это доля операций, выполняемых с использованием автоматизированных средств планирования, обработки данных или контроля. Обратный фактор сложности. Рост уровня автоматизации снижает влияние человеческого фактора и снижает сложность.

Вероятность доработок и ошибок (E_i) – это частота выявления несоответствий, ошибок и возвратов на предыдущие стадии. Интегрально характеризует качественную устойчивость процесса. Высокая вероятность ошибок отражает повышенную сложность и низкий уровень зрелости процедур.

Таким образом, выбор именно этих шести факторов обеспечивает достаточную полноту и измеримость методики, при этом сохраняется простота вычислений и возможность автоматизации расчетов в цифровой среде предприятия.

Интегральный показатель сложности K_i отдельного этапа рассчитывается по формуле (4).

$$K_i = \sum_{j=1}^{m} w_j \cdot X'_{ij}, \quad (4)$$

где X'_{ij} – нормированное значение j-го фактора, w_j – весовой коэффициент фактора.

Интегральный индекс сложности этапа K_i характеризует суммарное влияние организационных, технологических, информационных и человеческих факторов на выполнение работ в рамках соответствующего этапа жизненного цикла изделия.

Показатель принимает значения в интервале [0;1], где «0» соответствует полностью рутинным, стандартизированным процессам, а «1» – высокосложным, инновационным, с повышенной неопределенностью и риском сбоев.

Для интерпретации результатов была разработана балльная шкала, приведенная в таблице 2.

Таблица 2 – Балльная шкала интерпретации интегрального показателя сложности K_i

Ранг	Диапазон (K_i)	Качественный уровень сложности	Характеристика этапа	Типичные признаки и риски	Рекомендации по управлению и оптимизации	Возможные пути повышения надежности
1	0,00-0,15	Минимальный (рутинная)	Этап полностью регламентирован, операции повторяются без изменений, высокая степень автоматизации, отсутствует влияние человеческого фактора	Низкий риск ошибок, но возможна деградация гибкости и инновационности	Поддерживать уровень автоматизации, внедрять мониторинг оборудования (OEE, MES)	Внедрение TPM, предиктивного обслуживания, резервирования ресурсов
2	0,16-0,30	Низкий (стандартизированная)	Процессы типовые, исполнители действуют по регламентам, документооборот унифицирован	Возможны задержки из-за согласований или несовершенства ИТ-интеграции	Стандартизировать формы отчетности, внедрить электронное согласование и документооборот (EDM, PDM)	Развитие цифровых маршрутов и автоматизированных согласований
3	0,31-0,45	Умеренный (контролируемая)	Этап сочетает ручные и автоматизированные операции, возможны вариации по трудоемкости и длительности	Повышение вероятности несогласованных действий исполнителей	Внедрить KPI для исполнителей, использовать контроль загрузки ресурсов, расширить аналитические дашборды	Интеграция ERP-PDM, автоматизация планирования и нормирования
4	0,46-0,60	Средний (типовая)	Процессы включают проектные или инженерные решения, требующие экспертных знаний	Возможны ошибки при передаче данных, несогласованность между подразделениями	Усилить кросс-функциональные коммуникации, использовать централизованные базы данных (PLM)	Внедрить электронные маршруты согласований, автоматическую валидацию данных
5	0,61-0,75	Повышенный (вариативная)	Этап содержит нестандартные операции, высокий объем документов, умеренный уровень автоматизации.	Возникают задержки из-за согласований и доработок	Использовать гибридное планирование (Agile/Waterfall), цифровой контроль сроков, сценарное моделирование	Расширить автоматизацию и цифровую интеграцию, использовать системы Workflow и QMS

Ранг	Диапазон (K_i)	Качественный уровень сложности	Характеристика этапа	Типичные признаки и риски	Рекомендации по управлению и оптимизации	Возможные пути повышения надежности
6	0,76-0,90	Высокий (проектно-аналитическая)	Этапы включают многовариантные решения, междисциплинарное взаимодействие, значительный документооборот	Возрастают риски ошибок и перерасхода ресурсов, требуются частые корректировки ТЗ и КД	Ввести цифровые двойники (Digital Twin), использовать инструменты предиктивного анализа рисков	Создать экспертные подсистемы поддержки решений, усилить анализ данных PLM/ERP
7	0,91-1,00	Критический (инновационно-рисковая)	Этап включает уникальные разработки, опытно-конструкторские работы, малую повторяемость, высокий уровень неопределенности	Наибольший риск нарушений сроков и превышения трудоемкости, возможны множественные итерации и ошибки	Применять риск-ориентированное управление проектами (ISO 31000), итеративное тестирование, резервирование сроков и ресурсов	Внедрение систем цифрового предиктивного управления качеством, адаптивных моделей распределения ресурсов и интеллектуальной поддержки принятия решений (AI/ML)

Таким образом, методика оценки сложности процессов подготовки производства сводится к алгоритму, приведенному на рисунке 1.

Например, процесс «Инициация подготовки производства» представляет собой 20 этапов, каждый из которых имеет ряд операций. Сводные результаты расчета по формулам (1-4) представлены в таблице 3.

Таблица 3 иллюстрирует применение предложенного подхода к нормированию факторов и расчету интегрального показателя сложности по каждому этапу, что позволяет перейти к их ранжированию и выявлению наиболее проблемных участков процесса.

Коэффициенты значимости были рассчитаны с помощью итерационно-корреляционной методики: [5]

$$w_H = 0,18;\ w_T = 0,16;\ w_S = 0,18;\ w_A = 0,18;\ w_D = 0,12;\ w_E = 0,18.$$

Результат применения методики приведен на рисунке 2.

В результате применения разработанной методики интегральной оценки сложности процессов подготовки производства установлено, что к минимально-низким рангам сложности относится 6,52% этапов, к умеренно-средним – 42,39%, а к повышенно-высоким – 51,09%. Полученные результаты подтверждают, что в исследуемой системе подготовки производства преобладают этапы, характеризующиеся повышенной организационной, информационной и временной сложностью, что требует усиленного управленческого внимания. Низкая доля этапов минимально-низкой сложности свидетельствует о том, что полностью регламентированные и устойчивые процедуры составляют лишь ограниченную часть общего процесса, тогда как более половины этапов связаны с повышенной вероятностью задержек, доработок, ошибок согласования и перерасхода ресурсов. Разработанная методика позволяет не только количественно ранжировать этапы по уровню сложности, но и выявлять наиболее проблемные участки еще на стадии планирования, что создает основу для принятия обоснованных управленческих решений, направленных на перераспределение ресурсов, развитие автоматизации, сокращение избыточных согласований, оптимизацию документооборота и снижение вероятности повторных операций. Практическая значимость работы заключается в возможности использования методики на промышленных предприятиях в качестве инструмента ранней диагностики, приоритизации мероприятий по совершенствованию подготовки производства и повышения надежности плановых процессов в условиях цифровизации производственной среды.

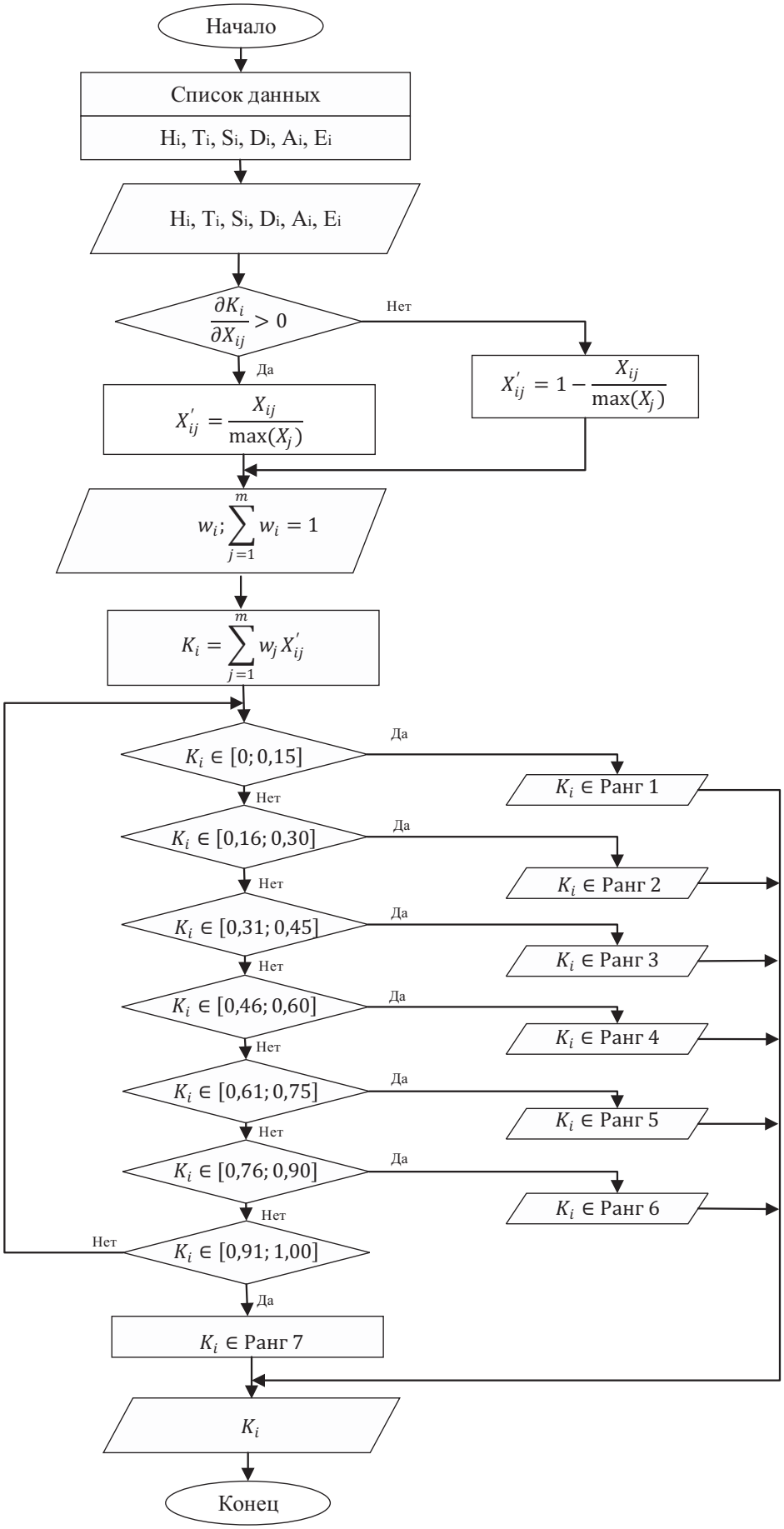

Рисунок 1 – Алгоритм реализации методики оценки сложности процессов подготовки производства

Таблица 3 – Результат расчета факторов по этапам
для процесса «Инициация подготовки производства»

Этап	H'_i	T'_i	S'_i	A'_i	D'_i	E'_i	K_i
1.1 Формирование стратегии развития	0,30	0,67	0,40	1,00	0,35	0,30	0,51
1.2 Анализ рынка и потребностей заказчиков	0,30	0,67	0,40	1,00	0,35	0,30	0,51
1.3 Определение направлений НИОКР	0,30	0,67	0,40	0,50	0,44	0,30	0,43
1.4 Участие в тендерах	0,80	0,92	0,75	1,00	0,30	0,50	0,73
1.5 Формирование целевых показателей проекта	0,41	0,67	0,55	0,50	0,30	0,30	0,46
1.6 Формирование поэтапного плана, бюджета и потребности в ресурсах	0,30	0,67	0,40	1,00	0,74	0,80	0,64
1.7 Согласование плана и бюджета работ	0,74	0,67	1,00	1,00	0,31	0,90	0,80
1.8 Утверждение плана и бюджета работ	0,52	0,67	0,70	1,00	0,47	0,70	0,69
1.9 Включение работ в портфель проектов	0,11	0,50	0,20	0,00	1,00	0,60	0,37
1.10 Учет бюджета работ в бюджете предприятия	0,14	0,50	0,25	1,00	0,80	0,50	0,52
1.11 Разработка технического задания на НИОКР	0,30	0,67	0,40	1,00	0,76	1,00	0,68
1.12 Согласование технического задания по изделию	0,59	0,67	0,80	1,00	0,32	0,70	0,70
1.13 Согласование технического задания по направлениям производства	0,69	0,63	1,00	1,00	0,26	0,80	0,76
1.14 Согласование технического задания по требованиям контроля	0,59	0,67	0,80	1,00	0,32	0,80	0,72
1.15 Согласование и утверждение технического задания	0,48	0,67	0,65	1,00	0,43	0,70	0,67
1.16 Регистрация технического задания в электронном архиве	0,14	0,50	0,25	0,00	0,75	0,70	0,37
1.17 Подготовка договора	1,00	1,00	0,90	1,00	0,34	0,90	0,88
1.18 Заключение договора	0,85	0,83	0,90	0,50	0,25	0,40	0,64
1.19 Регистрация договора и уточнение производственной программы	0,30	0,67	0,40	0,00	0,41	0,20	0,32
1.20 Открытие заказа на финансирование НИОКР	0,14	0,50	0,25	0,50	0,47	0,00	0,30

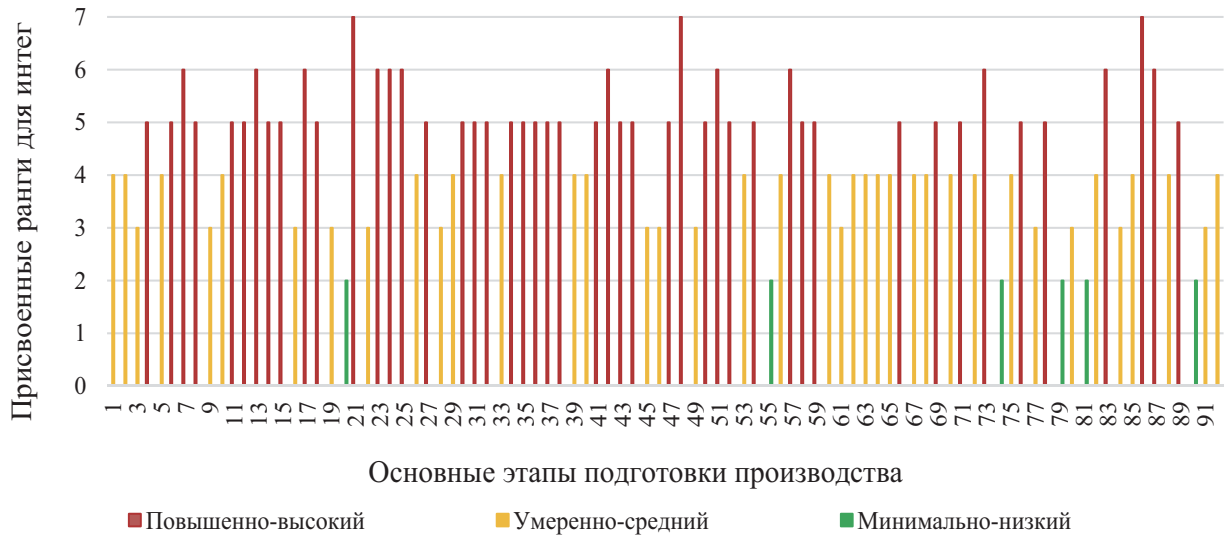

Рисунок 2 – Определение рангов интегрального индекса сложности

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ипатов, М. И.* Экономика, организация и планирование технической подготовки производства: учебное пособие для студентов / М. И. Ипатов, О. Г. Туровец. – М.: Высшая школа, 2007. – 319 с.
2. *Мауэргауз, Ю. Е.* «Продвинутое» планирование и расписания (AP&S) в производстве и цепочках поставок / Ю. Е. Мауэргауз – М.: Экономика, 2012. - 574 с.
3. *Мухин, В. И.* Исследование систем управления: учебник / В. И. Мухин. - 2-е изд., доп. и перераб. – М.: Издательство «Экзамен», 2006. – 479 с.
4. *Телишев, А. М.* Централизация единого информационного пространства инженерных справочников с применением средств автоматизации в объединениях производственных предприятий (холдингах, концернах) / А. М. Телишев // Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Новые технологии, материалы и оборудование Российской авиакосмической отрасли - АКТО-2016»: в 2-х т. – 2016. – С. 259-264.
5. *Саати, Т.* Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т. Саати. – М.: Радио и связь, 2011.

INTEGRATED ASSESSMENT OF THE COMPLEXITY OF PRODUCTION PREPARATION PROCESSES AT THE PLANNING STAGE

© 2026 T.I. Komarov

Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,
St. Petersburg, Russia

The article proposes a methodology for the integrated assessment of the complexity of production preparation processes at the planning stage. The methodology is based on a system of normalized factors characterizing labor intensity, execution time, number of participants, volume of documents and approvals, level of automation, as well as the probability of rework and errors. Based on the combination of these factors and their weighting coefficients, an integrated complexity index is calculated, making it possible to rank the stages of production preparation by complexity level. The application of the methodology has shown that a significant share of the stages in the studied system belongs to categories requiring increased managerial attention, coordination, and improvement of organizational and information support. The practical significance of the methodology lies in the possibility of using it for the early identification of problematic stages, justified resource reallocation, reduction of errors and rework risks, as well as improvement of the reliability and efficiency of production preparation processes.
Keywords: production preparation, planning, production preparation processes, integrated complexity assessment, stages of production preparation, complexity index, complexity factors, automation, document flow, management decisions

DOI: 10.37313/1990-5378-2026-28-2(2)-386-392
EDN: CARWPN

REFERENCES

1. *Ipatov, M. I.* Ekonomika, organizaciya i planirovanie tekhnicheskoj podgotovki proizvodstva: uchebnoe posobie dlya studentov / M. I. Ipatov, O. G. Turovec. – M.: Vysshaya shkola, 2007. – 319 s.
2. *Mauergauz, Yu. E.* «Prodvinutoe» planirovanie i raspisaniya (AP&S) v proizvodstve i cepochkah postavok / Yu. E. Mauergauz – M.: Ekonomika, 2012. - 574 s.
3. *Muhin, V. I.* Issledovanie sistem upravleniya: uchebnik / V. I. Muhin. - 2-e izd., dop. i pererab. – M.: Izdatel'stvo «Ekzamen», 2006. – 479 s.
4. *Telishev, A. M.* Centralizaciya edinogo informacionnogo prostranstva inzhenernyh spravochnikov s primeneniem sredstv avtomatizacii v ob»edineniyah proizvodstvennyh predpriyatij (holdingah, koncernah) / A. M. Telishev // Sbornik materialov Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem «Novye tekhnologii, materialy i oborudovanie Rossijskoj aviakosmicheskoj otrasli - AKTO-2016»: v 2-h t. – 2016. – S. 259-264.
5. *Saati, T.* Prinyatie reshenij. Metod analiza ierarhij / T. Saati. – M.: Radio i svyaz', 2011.

Timofey Komarov, Postgraduate Student of the Department of Innovation and Integrated Quality Systems.
E-mail: tim1kom@yandex.ru SPIN code: 5009-3930