

УДК 004:658.562  
DOI 10.17513/snt.40148

## РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ УЧЕТА ЭЛЕМЕНТОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРИ ОЦЕНКЕ ЕГО ПОКАЗАТЕЛЯ БЕЗОТКАЗНОСТИ

Тихонов М.Р., Акуленок М.В., Шикла О.С.

*ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет  
«Московский институт электронной техники», Москва, e-mail: kurotenshi91@yandex.ru*

Оценка влияния различных факторов на общие показатели надежности технологического процесса является важной задачей, а расчет показателя безотказности операций позволяет получить адекватное и корректное представление об их управляемости и стабильности. В качестве факторов могут выступать элементы этого процесса. Целью данного исследования является повышение точности оценки безотказности технологического процесса и его операций путем разработки способов учета элементов, их вероятностей безотказной работы и уточняющих коэффициентов. В работе представлен анализ возможной классификации элементов технологического процесса. Основой для такого группирования выбран метод 6М, суть которого заключается в применении следующих множеств: оборудование, персонал, материалы, методы, метрики, окружающая среда. Проведен анализ применимости такой классификации. Выбраны основные и дополнительные элементы технологического процесса, а также способы их учета при оценке безотказности операции и технологического процесса в целом: отдельный учет вероятности (расчет вероятности безотказности каждого элемента), применение уточняющего коэффициента (расчет вероятности безотказности оборудования и уточняющих коэффициентов дополнительных элементов), комбинирование вероятностей и коэффициентов (расчет вероятности безотказности нескольких элементов и уточняющих коэффициентов некоторых дополнительных элементов). Выбор способа зависит от особенностей продукции и практики ведения деятельности организации. В исследовании представлена схема преобразования данных способов учета вероятности безотказности элементов технологического процесса, позволяющая применить наработки данной статьи в процессе автоматизации оценки и контроля технологических операций при расчете их показателей безотказности и надежности, а также при формировании управленческого решения по их улучшению.

**Ключевые слова:** способы учета, безотказная работа, элементы процесса, классификация элементов, технологический процесс, автоматизация управления

## DEVELOPMENT OF METHODS FOR ACCOUNTING FOR ELEMENTS OF A TECHNOLOGICAL PROCESS WHEN ASSESSING ITS FAILURE-FREE INDICATOR

Tikhonov M.R., Akulenok M.V., Shikula O.S.

*National Research University of Electronic Technology, Moscow,  
e-mail: kurotenshi91@yandex.ru*

Assessing the influence of various factors on the general reliability indicators of a technological process is an important task, and calculating the failure-free operation indicator allows one to obtain an adequate and correct idea of their controllability and stability. Elements of this process can act as factors. The objective of this study is to improve the accuracy of assessing the failure-free operation of a technological process and its operations by developing methods for taking into account elements, their failure-free operation probabilities and clarifying coefficients. The paper presents an analysis of a possible classification of technological process elements. The 6M method was chosen as the basis for such grouping, the essence of which lies in the application of the following sets: equipment, personnel, materials, methods, metrics, environment. An analysis of the applicability of such a classification was carried out. The main and additional elements of the technological process, as well as methods for taking them into account when assessing the failure-free operation and the technological process as a whole were selected: separate accounting of probability (calculation of the failure-free probability of each element), application of a clarifying coefficient (calculation of the failure-free probability of equipment and clarifying coefficients of additional elements), a combination of probabilities and coefficients (calculation of the failure-free probability of several elements and clarifying coefficients of some additional elements). The choice of method depends on the characteristics of the product and the practice of conducting the organization's activities. The study presents a scheme for converting data of methods for accounting for the probability of failure-free operation of elements of the technological process, which allows applying the developments of this article in the process of automating the assessment and control of technological operations when calculating their indicators of failure-free operation and reliability, as well as when forming a management decision on their improvement.

**Keywords:** accounting methods, failure-free operation, process elements, classification of elements, technological process, control automation

### Введение

Технологический процесс состоит из множества различных аспектов, каждый из которых вносит свой прямой или косвенный вклад в формирование его итоговой продукции, а также уточняет оценку его показателей. Некоторые из них влияют на безотказность самого процесса или его операций, показатель которой свидетельствует о стабильной и управляемой деятельности. При этом нахождение универсального способа учета степени этого влияния является крайне сложной задачей, в связи с разнородностью аспектов и самого технологического процесса, зависящей в том числе от вида деятельности организации и типа итоговой продукции. Следовательно, необходимым и актуальным является анализ и разработка различных способов учета элементов технологического процесса при оценке его показателя безотказности.

**Цель исследования** – повышение точности оценки безотказности технологического процесса и его операций путем разработки способов учета элементов, их вероятностей безотказной работы и уточняющих коэффициентов.

### Материалы и методы исследования

Перед тем как разрабатывать способы учета элементов, важной задачей является их классификация. В качестве ее теоретической основы может быть использован метод 6М. Метод предполагает группирование причин (аспектов, элементов) на следующие виды [1]:

– оборудование. Причины, вызванные влиянием применяемого оборудования, станков, устройств и инструментов и зависящие от их характеристик надежности и управляемости;

– персонал. Причины, вызванные человеческим фактором и действиями сотрудников, персонала и операторов, которые могут быть связаны с нарушением инструкций или целенаправленными действиями;

– материалы. Причины, вызванные применяемым сырьем и дополнительными расходными материалами, получаемыми и закупаемыми у сторонних организаций, либо производимыми в процессах-поставщиках;

– методы. Причины, связанные с выбранными и применяемыми процедурами и последовательностями операций, зафиксированными в стандартах или реально используемыми на практике в организации;

– метрики. Причины, вызванные корректно или ошибочно выбранными параметрами мониторинга, анализа и оценки показателей деятельности технологического процесса или применяемых в нем объектов;

– окружающая среда. Причины, вызванные внешними по отношению к рассматриваемому и анализируемому объекту факторами. Зачастую метод 6М применяется вместе с причинно-следственной диаграммой [2, 3]. Она является способом анализа и визуального моделирования связей причин, сгруппированных в соответствии с выбранной классификацией, и рассматриваемого последствия. Графическое представление метода 6М отображено причинно-следственной диаграммой на рис. 1.

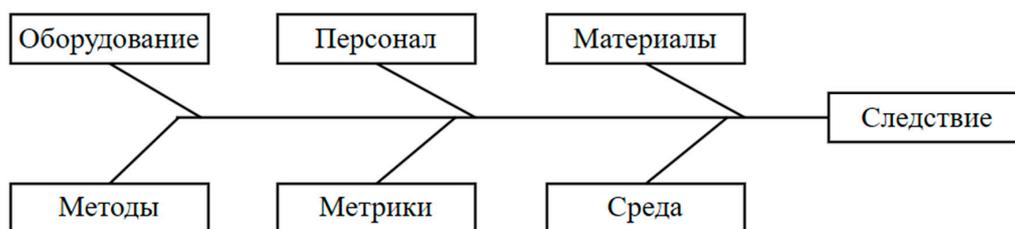


Рис. 1. Причинно-следственная диаграмма с методом 6М

Отображенная взаимосвязь факторов может быть уточнена более детальными причинами, входящими в соответствующие группы. Их содержание зависит от результатов анализа соответствующими ответственными лицами организации.

### Результаты исследования и их обсуждение

Для расчета показателя безотказности технологического процесса необходимо рас-

смотреть и оценить безотказность каждой его операции. На нее может влиять множество элементов рассматриваемой системы. В зависимости от принятой в организации практики выявления таких элементов возможны их различные наборы. В большинстве случаев особое место занимает оборудование. Это вызвано тем, что вопросы безотказности технологического процесса затрагиваются в тех организациях, в которых уже оценивается безотказность обо-

рудования на основе положений теории надежности. Зачастую это производство высокотехнологической и сложной продукции. Таким образом, в качестве общего основного элемента технологического процесса при расчете показателя безотказности может выступать оборудование.

Дополнительные элементы технологического процесса варьируются, однако для целей исследования возможен выбор и необходим анализ общих аспектов, покрывающих все возможные области влияния на технологический процесс и соответствующих методу 6М:

- персонал. Для многих процессов, в частности при участии оператора, данный фактор является важным. Сотрудники в рамках технологического процесса, в зависимости от степени автоматизации, могут с разной силой влиять на итоговую безотказность операции. Также немаловажной частью данного фактора является учет технологической дисциплины [4];

- материалы. Технологические процессы, в которых предъявляются требования к чистоте и/или качеству сырья, зависимы от влияния материалов на безотказность. Немаловажным является учет событий, связанных с надежностью поставщиков, их выбором и контролем выполняемых ими процессов, результаты которых применяются организацией в качестве сырья [5];

- методы. Применяемые методы и процедуры крайне важны в технологических процессах. В связи с этим их влияние на безотказность операций велико. Корректно выбранные методы связаны с адекватными последовательностями операций, которые позволяют достичь запланированного результата технологического процесса. Также, при необходимости, помимо результативности возможно рассмотрение влияния операций на эффективность достижения целей процесса [6];

- метрики. Основное влияние метрики оказывают на возможность корректной и адекватной оценки и последующего анализа достигнутых результатов, что влияет на оценку безотказности операций. Выбранные и отслеживаемые показатели оказывают непосредственное воздействие на принятие управленческих решений, так как результаты их оценки являются основой для анализа со стороны руководства организации и выбора путей улучшения технологического процесса [7];

- окружающая среда. Внешняя среда оказывает существенное влияние на вариabельность технологического процесса и, как следствие, на безотказность его операций. Источ-

никами такого воздействия могут выступать как поставщики, потребители, конкуренты и прочие заинтересованные лица, так и природные явления и техногенные воздействия на деятельность организации [8].

Расчет безотказности технологического процесса зависит от безотказности его операций, которые основываются на совокупности вероятностей безотказной работы элементов и уточняющих коэффициентов, и проводится по формуле

$$P = \prod_{i=1}^n P_i = \prod_{i=1}^n (p_i \times k_i),$$

где  $P$  – вероятность безотказности технологического процесса,  $P_i$  – вероятность безотказности операции  $i$ ,  $n$  – количество операций в процессе,  $p_i$  – совокупность вероятностей безотказности элементов в операции  $i$ ,  $k_i$  – совокупность уточняющих безотказность коэффициентов элементов в операции  $i$ .

Учет вероятности элемента не отличается от его учета в качестве уточняющего коэффициента (они оба перемножаются при расчете безотказности операций). Однако основное различие заключается в их сути и способе расчета.

Вероятность безотказности является показателем события и доли возможных благоприятных исходов по отношению к их общему числу. Он рассчитывается на основе положений теории надежности либо теории управления рисками. Такой показатель является более точным, но также более сложным и затратным по ресурсам, времени и технологии его расчета, что не позволяет его применять в любой организации и любых технологических процессах.

Уточняющий коэффициент является числом, позволяющим скорректировать значение безотказности операции на основе важности или стабильности элемента. Расчет уточняющего коэффициента осуществляется специфическими способами и требует дополнительной обработки и нормирования для обеспечения согласованности с другими элементами и итоговой вероятностью безотказности технологического процесса.

Для учета безотказности элементов технологического процесса при расчете показателя безотказности операции возможно рассмотрение следующих способов:

- отдельный учет вероятности (рис. 2, а) предполагает учет персонала, материалов, методов, метрик и среды как дополнительную вероятность. Такой способ расчета безотказности операции может быть представлен следующей формулой:

$$P_i = (p_{i, \text{Оборудование}} \times p_{i, \text{Персонал}} \times p_{i, \text{Материалы}} \times p_{i, \text{Методы}} \times p_{i, \text{Метрики}} \times p_{i, \text{Среда}}),$$

где  $P_i$  – вероятность безотказности операции  $i$ ,  $p_{i, \text{Оборудование}}$  – вероятность безотказности оборудования в операции  $i$ ,  $p_{i, \text{Персонал}}$  – вероятность безотказности персонала в операции  $i$ ,  $p_{i, \text{Материалы}}$  – вероятность безотказности материалов в операции  $i$ ,  $p_{i, \text{Методы}}$  – вероятность безотказности методов в операции  $i$ ,  $p_{i, \text{Метрики}}$  – вероятность безотказности метрик

в операции  $i$ ,  $p_{i, \text{Среда}}$  – вероятность безотказности окружающей среды в операции  $i$ ;

– применение уточняющего коэффициента (рис. 2, б) для учета безотказности дополнительных элементов технологического процесса. Такой способ расчета безотказности операции может быть представлен следующей формулой:

$$P_i = (p_{i, \text{Оборудование}}) \times (k_{i, \text{Персонал}} \times k_{i, \text{Материалы}} \times k_{i, \text{Методы}} \times k_{i, \text{Метрики}} \times k_{i, \text{Среда}}),$$

где  $P_i$  – вероятность безотказности операции  $i$ ,  $p_{i, \text{Оборудование}}$  – вероятность безотказности оборудования в операции  $i$ ,  $k_{i, \text{Персонал}}$  – уточняющий коэффициент безотказности персонала в операции  $i$ ,  $k_{i, \text{Материалы}}$  – уточняющий коэффициент безотказности материалов в операции  $i$ ,  $k_{i, \text{Методы}}$  – уточняющий коэффициент безотказности методов в операции  $i$ ,  $k_{i, \text{Метрики}}$  – уточняющий коэффициент безотказности метрик в операции  $i$ ,  $k_{i, \text{Среда}}$  – уточняющий

коэффициент безотказности окружающей среды в операции  $i$ ;

– комбинирование вероятностей и коэффициентов (рис. 2, в), при котором безотказность одной части элементов технологического процесса учитывается как дополнительная вероятность, а другой части – как уточняющие коэффициенты. Такой способ расчета безотказности операции зависит от выбранных вероятностей и коэффициентов и в частном случае может быть представлен формулой:

$$P_i = (p_{i, \text{Оборудование}} \times p_{i, \text{Персонал}} \times p_{i, \text{Методы}} \times p_{i, \text{Среда}}) \times (k_{i, \text{Материалы}} \times k_{i, \text{Метрики}}),$$

где  $P_i$  – вероятность безотказности операции  $i$ ,  $p_{i, \text{Оборудование}}$  – вероятность безотказности оборудования в операции  $i$ ,  $p_{i, \text{Персонал}}$  – вероятность безотказности персонала в операции  $i$ ,  $k_{i, \text{Материалы}}$  – уточняющий коэффициент безотказности материалов в операции  $i$ ,  $p_{i, \text{Методы}}$  – вероятность

безотказности методов в операции  $i$ ,  $k_{i, \text{Метрики}}$  – уточняющий коэффициент безотказности метрик в операции  $i$ ,  $p_{i, \text{Среда}}$  – вероятность безотказности окружающей среды в операции  $i$ .

Графическое представление описанных выше способов представлено на рис. 2.

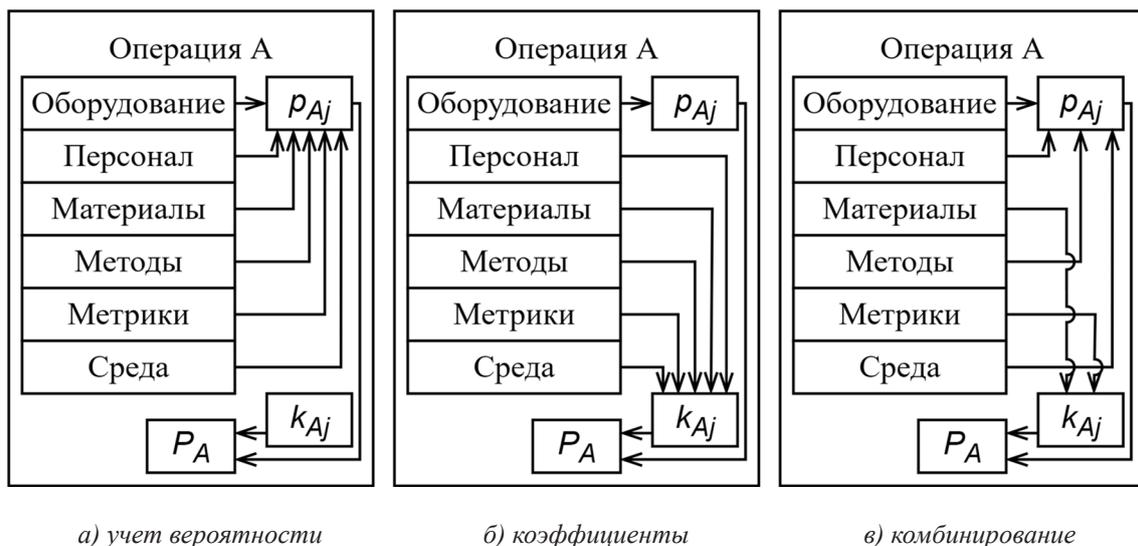


Рис. 2. Схема преобразования данных способов учета вероятности безотказности элементов технологического процесса

Данные схемы отображают общую последовательность передачи данных. Если стрелка от элемента технологического процесса подана в блок  $p_{Aj}$ , то данный фактор учитывается и рассчитывается как дополнительная вероятность. Если стрелка от элемента подана в блок  $k_{Aj}$ , то фактор учитывается и рассчитывается как дополнительный коэффициент.

### Выводы

В ходе исследования были решены следующие задачи:

1. Рассмотрена возможность применения метода 6М для классификации элементов технологического процесса. Метод предполагает классифицирование причин и факторов на 6 групп: оборудование, персонал, материалы, методы, метрики, окружающая среда. Такие аспекты согласуются с элементами технологического процесса и могут быть применены для их классификации в задачах расчета безотказности операций.

2. Проанализированы основной и дополнительные элементы технологического процесса при расчете показателя безотказности операции. В качестве основного элемента выбрано оборудование. Это обусловлено тем, что в большинстве случаев безотказность процесса основывается на безотказности применяемого в нем оборудования. Дополнительные элементы согласуются с методом 6М: персонал, материалы, методы, метрики, окружающая среда.

3. Разработаны и проанализированы способы расчета показателя безотказности операции и учета элементов процесса. К ним относятся: отдельный учет вероятности, применение уточняющего коэффициента, комбинирование вероятностей и коэффициентов. Каждый из способов применим с учетом особенностей технологического процесса и возможностей организации.

Разработанные в данном исследовании способы расчета показателя безотказности операции могут быть использованы при формировании решения о методе расчета безотказности всего технологического процесса. Выбор способа зависит от особенностей вида деятельности и принятой

практики внутри организации, реализующей технологический процесс. Применение дополнительных вероятностей, уточняющих коэффициентов или их комбинирования имеет свои преимущества, уточняющие общие параметры надежности технологического процесса. Представленные формулы и схема преобразования данных являются основой для построения соответствующей информационной системы контроля и расчета показателей процесса и его операций в рамках автоматизации процессов.

### Список литературы

1. Гирилович Н.В., Довгополая Г.В. Применение статистических методов при анализе несоответствий несоответствующей продукции в процессе производства // *Литье и металлургия*. 2021. № 3. С. 40–45.
2. Максимова И.Н., Крамор Д.Д. Применение инструментов качества – диаграммы Исикавы, диаграммы сроства, QFD-анализа – на примере производства электрического жарочного шкафа // *Вестник ПГУАС: строительство, наука и образование*. 2023. № 2 (17). С. 70–77.
3. Левин А.Д. Проблема человеческого фактора в авиации на примере диаграммы Исикавы // *Международный журнал гуманитарных и естественных наук*. 2024. № 2–2 (89). С. 132–136.
4. Вишневецкий Д.А., Сотников А.Л. Математическое моделирование влияния человеческого фактора на безотказность оборудования машиностроительных цехов металлургических предприятий // *Journal of Advanced Research in Technical Science*. 2021. № 24. С. 41–46.
5. Андрианов И.К., Палков К.А., Чепурнова Е.К. Влияние примесей жаропрочных никелевых сплавов, используемых в качестве материалов лопаток турбин, на процесс раскрытия трещин отрыва // *Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета*. 2023. № 1 (65). С. 4–8.
6. Прокопов С.П. Влияние форм организации технического обслуживания на безотказность и эффективность использования тракторов // *Каталог научных и инновационных разработок ФГБОУ ВО «Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина»: сборник материалов по итогам научно-исследовательской деятельности*. Омск: Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, 2021. С. 78–81.
7. Сарбей А.В., Захаров Н.С. Влияние наработок на отказ на показатели безотказности элементов трансмиссии специальных грузовых автомобилей нефтегазодобывающего предприятия // *Архитектура, строительство, транспорт*. 2021. № 4. С. 74–82.
8. Уласень А.Ф., Андреева О.Н., Ключев А.В., Мусин Д.А. Модели учета влияния среды эксплуатации на интенсивность потока устойчивых отказов и сбоев управляющих вычислительных систем // *Радиотехника*. 2021. Т. 85, № 3. С. 58–64.