

**Оценка характеристик фрагмента контроля и устранения дефектов (ошибок), допущенных при реализации технологического процесса****М. А. М. Амран<sup>✉</sup>, П. И. Падерно**

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

<sup>✉</sup> [mokhtar2011@gmail.com](mailto:mokhtar2011@gmail.com)

**Аннотация.** Рассмотрен фрагмент производства – многоступенчатый контроль результатов выполнения технологического процесса (проверка, диагностика и устранение выявленных дефектов продукта). Представлен общий алгоритм контроля, включающий предварительный контроль на рабочем месте и диагностический контроль на уровне участка и цеха с последующим устранением выявленных дефектов. Выявлена нетиповая элементарная операция с тремя выходами. Проанализированы все возможные пути и для каждого из них получены аналитические зависимости для вероятностных и временных оценок, а также для оценок числа операций, стереотипности и логической сложности. Показан способ сведения алгоритма к укрупненной рабочей операции, характеристики которой адекватно отражают особенности функционирования алгоритма (технологический процесс – контроль и устранение дефектов). Используя полученные оценки, можно решать ряд конкретных задач, связанных с улучшением алгоритма (снижением вероятности появления дефектов в результирующем продукте, изменение структуры (структурная оптимизация) алгоритма и др.). Проведенная на анализируемом алгоритме реализация подхода, основанного на выявлении путей в алгоритме, оценке их характеристик и расчете характеристик всего алгоритма в целом, показала жизнеспособность предлагаемого подхода. Полученные результаты могут найти применение в качестве методической и математической основы для создания различных средств поддержки принятия решений при проектировании и разработке человеко-машинных комплексов различного назначения.

**Ключевые слова:** технологический процесс, дефект, ошибка, контроль, устранение, вероятность, алгоритм деятельности, стереотипность, логическая сложность, число операций

**Для цитирования:** Амран М. А. М., Падерно П. И. Оценка характеристик фрагмента контроля и устранения дефектов (ошибок), допущенных при реализации технологического процесса // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2024. Т. 17, № 4. С. 21–29. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-4-21-29.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

**Characteristics of the Fragment of Control and Defect Elimination Made During Implementation of the Technological Process****М. А. М. Amran<sup>✉</sup>, P. I. Paderno**

Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

<sup>✉</sup> [mokhtar2011@gmail.com](mailto:mokhtar2011@gmail.com)

**Abstract.** This article considers a fragment of the technological process related to multi-stage monitoring of the production results (check, diagnostics, and elimination of the identified product defects). A general control algorithm is presented. This algorithm includes preliminary control at the workplace and diagnostic controls at the

site and workshop level, with subsequent elimination of the defects identified. An atypical elementary operation with three outputs was identified. All possible paths were analyzed followed by obtaining of analytical dependencies for probabilistic and time estimates, as well as for estimates of the number of operations, stereotypicality, and logical complexity. A method for reducing the algorithm to an enlarged work operation, whose characteristics adequately reflect the operational peculiarities of the algorithm (technological process – control and elimination of defects), is proposed. The obtained estimates can be used to solve a number of specific problems related to improving the algorithm (reducing the likelihood of defects in the resulting product, changing the structure (structural optimization) of the algorithm, etc.). The implementation of an approach based on identifying paths in the algorithm, assessing their characteristics, and calculating the characteristics of the entire algorithm confirmed the validity of the proposed approach. The results obtained can be used as a methodological and mathematical basis for creating various decision support tools in the design and development of human-machine systems for various purposes.

**Keywords:** technological process, defect, error, control, elimination, probability, activity algorithm, stereotypicality, logical complexity, number of operations

**For citation:** Amran M. A. M., Paderno P. I. Characteristics of the Fragment of Control and Defect Elimination Made During Implementation of the Technological Process // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2024. Vol. 17, no. 4. P. 21–29. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-4-21-29.

**Conflict of interest.** The authors declare no conflicts of interest.

**Введение.** Несмотря на значительный уровень автоматизации при реализации современных технологических процессов большое число операций (распознавание вида (типа) дефекта (допущенной ошибки), принятие решения, в том числе и о возможности (выборе способа) его устранения и др.) остаются за человеком. При этом, как показано в [1], доля операций, которые выполняет человек, остается практически неизменной на уровне 70–75 %, а количество таких операций постоянно возрастает. Следует заметить, что основная доля таких операций приходится на этап контроля произведенной продукции и идентификации дефектов, на котором резко возрастают различные риски, связанные с неправильным (недостаточно обоснованным) принятием соответствующих управленческих решений, полная автоматизация которых в настоящее время не представляется возможной. Несмотря на имеющиеся различные подходы к оценке характеристик деятельности человека на рабочем месте [2]–[6], как дискретной и алгоритмизированной, так и непрерывной, на практике используют только некоторые из них [2], [5], [6]. При этом потребителя (разработчика, проектировщика) интересуют в основном характеристики времени и безошибочности решения задач, а также темповая напряженность, общее число операций, стереотипность и логическая сложность деятельности.

**Постановка задачи.** Рассмотрим многоступенчатый контроль, который проводится после выполнения некоторого технологического про-

цесса (ТП), реализующего заданный алгоритм производства некоторого продукта (мало или мелко серийного), ошибка при выполнении которого может повлечь за собой весьма серьезные последствия [7].

*Замечание 1.* Поскольку количество операций, выполняемых оператором, в том числе и для принятия решений, очень велико, для дальнейшего улучшения контроля (снижения вероятности ошибок (доли брака)) необходимо, кроме оценки безошибочности отдельных операций и контроля в целом, оценивать среднее время его реализации (в дальнейшем возможна и оценка среднего ресурса) и показатели логической сложности и стереотипности всего многоэтапного (ветвящегося) процесса контроля качества результатов технологического процесса в целом.

**Описание алгоритма контроля.** Ветвящийся алгоритм контроля результатов ТП (части ТП) (рис. 1) включает первоначальный контроль (КП), реализуемый самим исполнителем (работником) на рабочем месте (РМ). В случае обнаружения дефектов в проверяемом продукте (ошибки, несоответствия заданным требованиям) продукт передается для проведения уточненного контроля с диагностикой на уровень участка (КДУ) (с целью идентификации ошибки (вида брака) и рассмотрения возможности его устранения. Если же блок первоначального контроля признал продукт годным, то он передается далее (фиктивный блок Е) для использования по назначению, в том числе при изготовлении системы в целом.

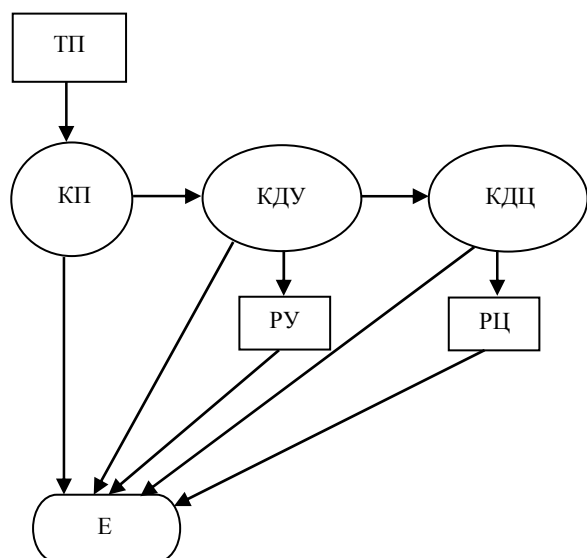


Рис. 1. Укрупненная схема многоступенчатого контроля результатов технологического процесса  
Fig. 1. Enlarged scheme of multi-stage monitoring of technological process results

*Замечание 2.* Блок первоначального контроля КП определяет *только* наличие ошибок в технологическом процессе (неполное соответствие полученного продукта предъявляемым требованиям вследствие каких-либо дефектов). При этом возможны ошибки при проведении самого контроля, т. е. признание наличия ошибки в ТП при ее отсутствии (ложная частичная браковка продукта), а также пропуск ошибки (брака).

Уточненный контроль с диагностикой (блок КДУ) реализуется уже на уровне участка. Техническое оснащение участка контролирующей аппаратурой значительно выше, чем в блоке первоначального контроля, что в значительной степени снижает, а в некоторых случаях даже исключает вероятность соответствующих ошибок. В случае обнаружения конкретного нарушения в ТП, которое идентифицировано как устранимое и для точного определения дефекта продукт передается в ремонтную бригаду данного участка (блок РУ). При идентификации продукта как годного, попавшего на уточненный контроль вследствие ошибки в блоке первоначального контроля (КП), продукт, как и в предыдущем случае, передается в фиктивный блок Е, т. е. далее не проверяется. В случае невозможности идентификации конкретного нарушения в ТП (определения типа дефекта продукта) ввиду ограниченности возможностей аппаратуры блока КДУ продукт передается в отдел технического контроля цеха (блок КДЦ) для последующей проверки (изучения, уточнения).

*Замечание 3.* В нашем случае будем полагать, что на данном этапе контроля *не все* годные продукты идентифицируются однозначно, а также некоторые нарушения в ТП (дефекты) могут быть пропущены.

Устранение обнаруженных в блоке КДУ недостатков реализуется ремонтной бригадой данного участка (блок РУ). После устранения выявленных недостатков продукт, так же, как и в предыдущем случае, передается в фиктивный блок Е, т. е. далее не проверяется. При этом будем предполагать, что продукт становится годным, т. е. все установленные дефекты устраняются, а новые не появляются (ошибки не вносятся).

Технический контроль с соответствующей диагностикой (блок КДЦ) реализуется на уровне всего цеха. Техническое оснащение значительно выше, чем в блоках первоначального (КП) и уточненного (КДУ) контроля. Это практически исключает возможность появления соответствующих ошибок контроля. В случае обнаружения конкретного нарушения технологии изготовления продукта (типа дефекта продукта), которое идентифицировано и может быть устранено, продукт передается в ремонтную бригаду цеха (блок РЦ). При идентификации продукта как годного, что не было выявлено ранее в процессе первоначального (КП) и уточненного (КДУ) контроля, продукт, как и в предыдущем случае передается в фиктивный блок Е, т. е. далее не проверяется.

*Замечание 4.* В данном случае будем полагать, что на данном этапе контроля все годные продукты идентифицируются однозначно, но возможность появления неустранимых дефектов продуктов (ошибок), появившихся вследствие некоторого нарушения в ТП, не рассматривается.

Устранение обнаруженных в блоке КДЦ недостатков реализуется ремонтной бригадой цеха (блок РЦ). По аналогии с устранением недостатков, реализуемым в блоке  $P_1$ , после устранения выявленных недостатков продукт, как и в предыдущем случае, передается в фиктивный блок Е, т. е. далее не проверяется. При этом, по аналогии с блоком РУ, будем предполагать, что продукт становится годным, т. е. все выявленные дефекты (недостатки) устраняются, а новые не появляются (ошибки не вносятся).

**Анализ характеристик блоков, участвующих в алгоритме контроля.** Технологический процесс (ТП) может быть реализован как правильно, так и с ошибкой, ставшей причиной некоторого дефекта в конечном продукте, с соответ-

ствующими вероятностями –  $\beta_{\text{ТП}}^1 (\beta_{\text{ТП}}^0)$ . При этом ошибки в ТП и вызываемые ими дефекты могут быть различными, что может обуславливать различные способы их обнаружения контролем на различных уровнях (процесс, участок, цех) и устранения соответствующими ремонтными бригадами на соответствующих этапах. Кроме того, полагаем, что нам также известны:  $T_{\text{ТП}}$  – среднее время реализации ТП;  $n_{\text{ТП}}$  – общее число операций (элементарных и логических), выполняемых в рамках ТП (фрагмента ТП) при изготовлении продукта;  $Z_{\text{ТП}}$ ,  $L_{\text{ТП}}$  – значения нормированных показателей стереотипности и логической сложности для всего комплекса операций, выполняемых в рамках ТП.

*Замечание 5.* Под понятием *известны* здесь и далее будем подразумевать, что значения показателей были определены ранее известными методами [5], [6], [8]–[11].

Блок первоначального контроля (КП) включает некоторый комплекс различных операций. Будем полагать, что известны следующие характеристики этого блока:

$K_{\text{КП}}^{11} (K_{\text{КП}}^{10})$  – условная вероятность того, что проверяемый результат ТП (продукт) при фактически правильном выполнении ТП будет признан правильным (дефектным), причем  $K_{\text{КП}}^{11} + K_{\text{КП}}^{10} = 1$ ;

$K_{\text{КП}}^{00} (K_{\text{КП}}^{01})$  – условная вероятность того, что проверяемый результат ТП (продукт) при неправильном выполнении ТП будет признан неправильным (правильным), причем  $K_{\text{КП}}^{00} + K_{\text{КП}}^{01} = 1$ ;

$T_{\text{КП}}$  – среднее время осуществления первоначального контроля продукта на рабочем месте (реализации блока КД);

$n_{\text{КП}}$  – общее число операций (элементарных и логических), выполняемых при проведении первоначального контроля КП;

$Z_{\text{КП}}$ ,  $L_{\text{КП}}$  – значения нормированных показателей стереотипности и логической сложности для всего комплекса операций, выполняемых при проведении контроля КД.

Блок контроля и диагностики на уровне участка (КДУ). Для этого блока, по аналогии с блоком КП, будем полагать, что известны следующие характеристики:

$K_{\text{КДУ}}^{01} (K_{\text{КДУ}}^{00}, K_{\text{КДУ}}^{0Y})$  – условная вероятность того, что проверяемый на наличие дефектов про-

дукт *при наличии дефектов* будет ошибочно признан годным, негодным (без установления конкретного дефекта), дефектным (с установлением конкретного дефекта), при этом выполняется равенство  $K_{\text{КДУ}}^{01} + K_{\text{КДУ}}^{00} + K_{\text{КДУ}}^{0Y} = 1$ ;

$K_{\text{КДУ}}^{11} (K_{\text{КДУ}}^{10})$  – условная вероятность того, что проверяемый *годный* продукт будет признан годным (имеющим дефекты, при этом вид (тип) дефекта не может быть установлен)  $K_{\text{КДУ}}^{11} + K_{\text{КДУ}}^{10} = 1$ , а также  $T_{\text{КДУ}}$  – среднее время реализации блока КДУ,  $n_{\text{КДУ}}$  – общее число операций, реализуемых в рамках выполнения блока КДУ,  $Z_{\text{КДУ}}$ ,  $L_{\text{КДУ}}$  – значения нормированных показателей стереотипности и логической сложности для блока КДУ.

*Замечание 6.* Блок КДУ принципиально отличается от обычного блока контроля правильности выполнения [5] тем, что в нем также диагностируются дефекты, т. е. такой блок расширяет номенклатуру типовых функциональных единиц [5], [6] и имеет большее число выходов.

Блок устранения дефектов на уровне участка (блок РУ). Ввиду того, что, по предположению, в этом блоке ошибки не совершаются, то для этого блока будем использовать только характеристики:  $T_{\text{РУ}}$  – среднего времени выполнения,  $n_{\text{РУ}}$  – общего числа операций, а также  $Z_{\text{РУ}}$ ,  $L_{\text{РУ}}$  – значения нормированных показателей стереотипности и логической сложности.

Блок контроля и диагностики на уровне цеха (КДЦ). Пропуск дефектов возможен, хотя и маловероятен, но годный продукт распознается безошибочно. Вероятностные характеристики, которые будут учитываться в дальнейшем:

$K_{\text{КДЦ}}^{01} (K_{\text{КДЦ}}^{0Y})$  – условная вероятность того, что проверка продукта на наличие дефектов ошибочно пропустила дефект (идентифицировала конкретный дефект)  $K_{\text{КДЦ}}^{01} + K_{\text{КДЦ}}^{0Y} = 1$ ;  $K_{\text{КДУ}}^{11} = 1$  – годный продукт всегда будет признан годным. Как и в предыдущих случаях, будем использовать характеристики:  $T_{\text{КДЦ}}$  – среднего времени выполнения,  $n_{\text{КДЦ}}$  – общее число операций, а также  $Z_{\text{КДЦ}}$ ,  $L_{\text{КДЦ}}$  – значения нормированных показателей стереотипности и логической сложности.

Блок РЦ – устранение дефектов на уровне цеха. Как и в блоке РЦ, ошибки при выполнении блока РЦ не совершаются (новые дефекты не проявляются). Таким образом, для блока РЦ будем

использовать только характеристики:  $T_{рц}$  – среднего времени выполнения,  $n_{рц}$  – число операций,  $Z_{рц}$ ,  $L_{рц}$  – значения нормированных показателей стереотипности и логической сложности.

**Анализ путей.** Проанализируем все возможные пути, соединяющие начало (блок первоначального контроля КП) и конец (блоки Е) пути (рис. 2). Для каждого из этих путей вычислим соответствующие их вероятности, среднее время, затрачиваемое на каждый путь, а также общее число операций и показатели логической сложности и стереотипности.

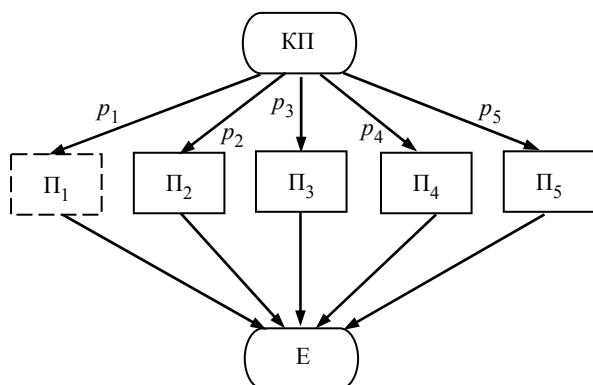


Рис. 2. Укрупненные пути и их вероятности  
Fig. 2. Enlarged paths and their probabilities

Путь П1 соответствует факту признания отсутствия дефектов в продукте на этапе проведения предварительного контроля (КП). Вероятность этого пути  $p_1 = \beta^1 K_{КП}^{11} + \beta^0 K_{КП}^{01}$ . Среднее время, затрачиваемое на путь, число операций и показатели логической сложности и стереотипности совпадают с аналогичными показателями блока КП:  $T_{П1} = T_{КП}$ ,  $Z_{П1} = Z_{КП}$ ,  $L_{П1} = L_{КП}$ ,  $n_{П1} = n_{КП}$ . Путь П1, вообще говоря, – это прямой переход (дуга) от блока КП к виртуальному блоку Е, и на рис. 2 выделен штрихом.

*Замечание 7.* Результатом данного пути могут быть как правильно распознанные годные продукты, так и ошибочные принятые дефектные в качестве годных. Для дальнейшего анализа уровня брака (оценки вероятности принятия дефектного продукта) будем каждый путь разбивать (при возможности) на составляющие, относящиеся как к принятию годного продукта (добавление в индекс 1), так и к принятию дефектного (добавление в индекс 0).

Тогда для пути П1 имеем следующие соотношения:  $p_{11} = \beta^1 K_{КП}^{11}$ ,  $p_{10} = \beta^0 K_{КП}^{01}$ .

Путь П2 соответствует признанию наличия (на уровне блока КП) некоторых дефектов в проверяемом продукте и передаче его для последующих контроля и диагностики на уровень участка. В процессе контроля и диагностики на уровне участка (блок КДУ) было принято одно из следующих решений:

- после ТП продукт был годным, но был неправильно забракован на уровне блока КП;
- продукт, который был дефектным и ранее был признан дефектным, является (ошибка контроля блока КДУ) годным.

Реализацией каждого из этих решений служит переход от блока КДУ к виртуальному блоку Е (окончание пути). Вероятность пути П2  $p_2 = \beta^1 K_{КП}^{10} K_{КДУ}^{11} + \beta^0 K_{КП}^{00} K_{КДУ}^{01}$ , причем составляющие имеют вид  $p_{21} = \beta^1 K_{КП}^{10} K_{КДУ}^{11}$ ,  $p_{20} = \beta^0 K_{КП}^{00} K_{КДУ}^{01}$ . Среднее время, затрачиваемое на данный путь, равно сумме времен контроля:  $T_{П2} = T_{КП} + T_{КДУ}$ . Количество операций, показатели стереотипности и логической сложности для данного пути можно вычислить по формулам

$$n_{П2} = n_{КП} + n_{КДУ};$$

$$Z_{П2} = \frac{Z_{КП} n_{КП} + Z_{КДУ} n_{КДУ}}{n_{КП} + n_{КДУ}}; \quad (1)$$

$$L_{П2} = \frac{L_{КП} n_{КП} + L_{КДУ} n_{КДУ}}{n_{КП} + n_{КДУ}}.$$

Путь П3 соответствует признанию наличия (на уровне блока КП) дефектов в проверяемом продукте, обнаружению конкретных дефектов при диагностическом контроле на уровне участка (блок КДУ) и передаче его для последующих контроля и диагностики на уровень участка. После контроля и диагностики на уровне участка (блок КДУ) продукт передается на ремонт, реализуемый на уровне участка (блок РУ), и, после устранения выявленных дефектов, годный продукт передается для дальнейшего использования (блок Е). Вероятность пути П3 определяется по формуле  $p_3 = \beta^0 K_{КП}^{00} K_{КДУ}^{0У}$ , а среднее время, затрачиваемое на данный путь, равно сумме времен контроля и среднего времени устранения дефектов  $T_{П3} = T_{КП} + T_{КДУ} + T_{РУ}$ . Количество операций, реализуемых на этой траектории, показатели стереотипности и логической сложности вычисляются по формулам:

$$n_{\Pi_3} = n_{\text{КП}} + n_{\text{КДУ}} + n_{\text{РУ}};$$

$$Z_{\Pi_3} = \frac{Z_{\text{КП}}n_{\text{КП}} + Z_{\text{КДУ}}n_{\text{КДУ}} + Z_{\text{РУ}}n_{\text{РУ}}}{n_{\text{КП}} + n_{\text{КДУ}} + n_{\text{РУ}}}; \quad (2)$$

$$L_{\Pi_3} = \frac{L_{\text{КП}}n_{\text{КП}} + L_{\text{КДУ}}n_{\text{КДУ}} + L_{\text{РУ}}n_{\text{РУ}}}{n_{\text{КП}} + n_{\text{КДУ}} + n_{\text{РУ}}}.$$

Путь  $\Pi_4$  соответствует признанию наличия (на уровне блоков КП и КДУ) некоторых дефектов в проверяемом продукте (без их идентификации) и передаче его для последующего контроля и диагностики на уровень цеха (блок КДЦ). В процессе контроля и диагностики на уровне цеха было принято одно из следующих решений:

– после ТП продукт изначально был годным, но был неправильно признан дефектным на предыдущих уровнях (на уровне блоков КП и КДУ) и признан годным на уровне блока КДЦ;

– продукт, который изначально был дефектным и ранее был признан дефектным на уровне блоков КП и КДУ (без идентификации конкретного дефекта), является (ошибка блока КДЦ) годным.

Реализацией каждого из этих решений служит переход от блока КДЦ к виртуальному блоку Е (окончание пути). Вероятность пути  $\Pi_4$

$$p_4 = \beta^1 K_{\text{КП}}^{10} K_{\text{КДУ}}^{10} K_{\text{КДЦ}}^{11} + \beta^0 K_{\text{КП}}^{00} K_{\text{КДУ}}^{00} K_{\text{КДЦ}}^{01},$$

причем составляющие имеют вид  $p_{41} = \beta^1 K_{\text{КП}}^{10} \times K_{\text{КДУ}}^{10} K_{\text{КДЦ}}^{11}$ ,  $p_{40} = \beta^0 K_{\text{КП}}^{00} K_{\text{КДУ}}^{00} K_{\text{КДЦ}}^{01}$ .

*Замечание 8.* Как было установлено ранее, справедливо соотношение  $K_{\text{КДЦ}}^{11} = 1$ .

Среднее время, затрачиваемое на данный путь равно сумме средних времен реализации контрольного и контрольно-диагностических блоков  $T_{\Pi_4} = T_{\text{КП}} + T_{\text{КДУ}} + T_{\text{КДЦ}}$ . Общее число операций, показатели стереотипности и логической сложности вычисляются по формулам

$$n_{\Pi_4} = n_{\text{КП}} + n_{\text{КДУ}} + n_{\text{КДЦ}};$$

$$Z_{\Pi_4} = \frac{Z_{\text{КП}}n_{\text{КП}} + Z_{\text{КДУ}}n_{\text{КДУ}} + Z_{\text{КДЦ}}n_{\text{КДЦ}}}{n_{\text{КП}} + n_{\text{КДУ}} + n_{\text{КДЦ}}}; \quad (3)$$

$$L_{\Pi_4} = \frac{L_{\text{КП}}n_{\text{КП}} + L_{\text{КДУ}}n_{\text{КДУ}} + L_{\text{КДЦ}}n_{\text{КДЦ}}}{n_{\text{КП}} + n_{\text{КДУ}} + n_{\text{КДЦ}}}.$$

Путь  $\Pi_5$ . В процессе контроля и диагностики на уровне цеха был идентифицирован конкретный дефект (несколько дефектов), продукт передан на ремонт, реализуемый на уровне цеха (блок РЦ), и по-

сле устранения *всех* выявленных дефектов (ставший годным) передан для дальнейшего использования (блок Е). Вероятность пути  $\Pi_5$  определяется по формуле  $p_5 = \beta^0 K_{\text{КП}}^{00} K_{\text{КДУ}}^{00} K_{\text{КДЦ}}^{0Y}$ , а среднее время, затрачиваемое на данный путь, равно сумме всех времен контроля (контрольного и контрольно-диагностических блоков), а также среднего времени устранения дефектов на уровне цеха  $T_{\Pi_5} = T_{\text{КП}} + T_{\text{КДУ}} + T_{\text{КДЦ}} + T_{\text{РУ}}$ . Общее число операций, реализуемых на этой траектории, показатели стереотипности и логической сложности вычисляются по формулам

$$n_{\Pi_5} = n_{\text{КП}} + n_{\text{КДУ}} + n_{\text{КДЦ}} + n_{\text{РЦ}};$$

$$Z_{\Pi_5} = \left( Z_{\text{КП}}n_{\text{КП}} + Z_{\text{КДУ}}n_{\text{КДУ}} + Z_{\text{КДЦ}}n_{\text{КДЦ}} + Z_{\text{РЦ}}n_{\text{РЦ}} \right) / \left( n_{\text{КП}} + n_{\text{КДУ}} + n_{\text{КДЦ}} + n_{\text{РЦ}} \right); \quad (4)$$

$$L_{\Pi_5} = \left( L_{\text{КП}}n_{\text{КП}} + L_{\text{КДУ}}n_{\text{КДУ}} + L_{\text{КДЦ}}n_{\text{КДЦ}} + L_{\text{РЦ}}n_{\text{РЦ}} \right) / \left( n_{\text{КП}} + n_{\text{КДУ}} + n_{\text{КДЦ}} + n_{\text{РЦ}} \right).$$

**Вычисление средних характеристик для всего комплекса контролей в целом.** Используя формулы, приведенные в [8]–[11], для оценки среднего числа операций в алгоритмах с возможным альтернативным выполнением отдельных частей, а также для оценки среднего времени и показателей стереотипности и логической сложности таких алгоритмов, для всех путей (рис. 2), проанализированных в исследуемом алгоритме (рис. 1) (комплексе контрольных, контрольно-диагностических и ремонтных блоков различных уровней) на основе полученных ранее соотношений (формулы (1)–(4)) можно определить: среднее время выполнения фрагмента, связанного с осуществлением контрольно-диагностических и ремонтных работ,  $T_{\text{К}} = \sum_{i=1}^5 p_i T_{\Pi_i}$ ; количество опера-

ций  $N_{\text{К}} = \sum_{i=1}^5 p_i n_{\Pi_i}$ , а также значения показателей

$$\text{стереотипности} \quad Z_{\text{К}} = \frac{\sum_{i=1}^5 p_i n_{\Pi_i} Z_{\Pi_i}}{\sum_{i=1}^5 p_i n_{\Pi_i}} = \frac{\sum_{i=1}^5 p_i n_{\Pi_i} Z_{\Pi_i}}{N_{\text{К}}}$$

и логической сложности

$$L_{\text{К}} = \frac{\sum_{i=1}^5 p_i n_{\Pi_i} L_{\Pi_i}}{\sum_{i=1}^5 p_i n_{\Pi_i}} = \frac{\sum_{i=1}^5 p_i n_{\Pi_i} L_{\Pi_i}}{N_{\text{К}}}.$$

*Замечание 9.* При оценке характеристик путей были вычислены вероятности как правильного

признания бездефектного продукта годным, так и ошибочного пропуска дефектного продукта. Используя полученные оценки, а также учитывая изначальные характеристики технологического процесса можно получить результирующие оценки для характеристик укрупненной рабочей операции ( $S$ ) (рис. 3) (в терминах обобщенного структурного метода и функциональной теории [5], [6]), адекватно отражающей функционирование всей структуры (технологический процесс – контроль и устранение дефектов).

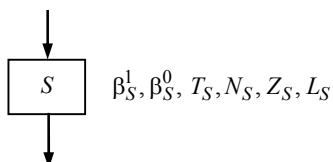


Рис. 3. Укрупненная рабочая операция и перечень ее основных характеристик  
Fig. 3. Enlarged work operation and a list of its main characteristics

**Результирующие оценки.** Среднее время выполнения всего комплекса работ по технологическому производству продукта и его многоступенчатому контролю и, при необходимости, диагностическому контролю  $T_S = T_{ТП} + T_K$ , общее количество операций  $N_S = n_{ТП} + N_K$ , нормированные значения показателей стереотипности  $Z_S = \frac{n_{ТП}Z_{ТП} + N_K Z_K}{n_{ТП} + N_K}$  и логической сложности  $L_S = \frac{n_{ТП}L_{ТП} + N_K L_K}{n_{ТП} + N_K}$ . Вероятностными оценками служат вероятность правильного (безошибочного) выполнения укрупненной операции  $\beta_S^1$  (вероятность годности продукта, переданного в блок Е) и вероятность ошибки  $\beta_S^0 = 1 - \beta_S^1$ , т. е. вероятность того, что в блок Е был передан дефектный продукт:

$$\beta_S^1 = \beta^1 \left[ K_{КП}^{11} + K_{КП}^{10} \left( K_{КДУ}^{11} + K_{КДУ}^{10} K_{КДЦ}^{11} \right) \right] + \beta^0 K_{КП}^{00} \left( K_{КДУ}^{00} + K_{КДУ}^{00} K_{КДЦ}^{00} \right); \quad (5)$$

$$\beta_S^0 = \beta^0 \left[ K_{КП}^{01} + K_{КП}^{00} \left( K_{КДУ}^{01} + K_{КДУ}^{00} K_{КДЦ}^{01} \right) \right].$$

*Замечание 10.* Как видно из (5), основной источник скрытого брака – это пропуск дефектов на первоначальном контроле (КП), реализуемом на рабочем месте. Для снижения скрытого брака в [7] предложено усилить первоначальный контроль за счет передачи соответствующих технических средств диагностического контроля с уровня участка на конкретные рабочие места. Кроме того, в целях повышения персональной ответственности работников за правильность проведения диагностического контроля предложено ввести для сотрудников личные печати качества.

**Заключение.** Выявлены нетиповые функциональные элементы, содержащиеся в анализируемом фрагменте алгоритма деятельности (с тремя альтернативными выходами), связанные с контрольно-диагностическими операциями. Проведена апробация подхода, основанного на выявлении путей, расчете их характеристик и расчете комплекса характеристик всего фрагмента (алгоритма в целом). Апробация показала жизнеспособность предлагаемого подхода. Использование данного подхода позволит:

- оценивать необходимые характеристики как отдельных фрагментов АД, так и АД в целом, в том числе АД, имеющих достаточно сложную сетевую структуру;
- анализировать соответствие требованиям заказчика и нормативно-технической документации фрагментов АД, а также АД в целом;
- оперативно оценивать и, при необходимости, вносить улучшения в проектируемые АД.

*Перспективы.* Предлагаемый подход при соответствующей доработке и адаптации может быть положен в основу разрабатываемого информационно-программного модуля, предназначенного для оценки характеристик широкого спектра АД на стадии разработки и проектирования, который может впоследствии быть включен в систему поддержки деятельности разработчика, в качестве отдельного блока оценки АД.

#### Список литературы

1. Нефедович А. В. Практическая эргономика при создании кораблей ВМФ. СПб.: НИИ кораблестроения и вооружения ВМФ ВУНЦ ВМФ «ВМА», 2019. 176 с.
2. Военная инженерная психология / Б. Ф. Ломов, А. А. Васильев, В. В. Офицеров, В. Ф. Рубахин. М.: Воениздат, 1970. 401 с.
3. Заракровский Г. М. Психофизиологический анализ трудовой деятельности (логико-вероятностный подход при изучении труда управляющего типа). М.: Наука, 1966. 114 с.
4. Суходольский Г. В. Структурно-алгоритмический анализ и синтез деятельности. Л.: ЛГУ, 1976. 120 с.

5. Губинский А. И., Евграфов В. Г. Эргономическое проектирование судовых систем управления. Л.: Судостроение, 1977. 224 с.

6. Информационно-управляющие человеко-машинные системы: исследование, проектирование, испытания: справочник / А. Н. Адаменко, А. Т. Ашеро- в, И. Л. Бердников, А. И. Губинский, В. Г. Евграфов. М.: Машиностроение, 1993. 528 с.

7. Кобзев В. В., Шилов А. К. Моделирование техно- логического процесса на основе многомерных функциональных сетей // Системы управления и обра- ботки информации: науч.-техн. сб. / АО «Концерн НПО «Аврора». СПб. 2021. Вып. 3(54). С. 64–70.

8. Падерно П. И. Алгоритмы деятельности – опи- сание и оценка // Человеческий фактор. Сер. Про- блемы психологии и эргономики. 2015. № 3. С. 37–40.

9. Назаренко Н. А., Падерно П. И., Саторов Ф. Э. Способ оценки логической сложности и стереотип- ности алгоритмов деятельности операторов // Науч.- техн. вестн. информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19, № 4. С. 740–746.

10. Назаренко Н. А., Падерно П. И. Табличный метод оценки логической сложности и стереотипности алго- ритмов деятельности оператора // Системы управления и обработки информации: науч.-техн. сб. / АО «Концерн НПО «Аврора». СПб. 2023. Вып. 2(57). С. 70–76.

11. Назаренко Н. А., Падерно П. И. Оценка логи- ческой сложности и стереотипности циклических структур в алгоритмах деятельности оператора // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2020. № 1. С. 52–60.

---

### Информация об авторах

**Амран Мухтар Ахмед Мохаммед** – аспирант кафедры информационных систем СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: mokhtar2011@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0006-5045-9778>

**Падерно Павел Иосифович** – д-р техн. наук, профессор кафедры информационных систем СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Заслуженный деятель науки РФ.

E-mail: pipaderno@list.ru

<https://orcid.org/0000-0001-9032-5084>

### References

1. Nefedovich A. V. Prakticheskaja jergonomika pri sozdanii korablej VMF: monografija. SPb.: NII ko- rablestroenija i vooruzhenija VMF VUNC VMF «VMA», 2019. 176 s. (In Russ.).

2. Voennaja inzhenernaja psihologija / B. F. Lomov, A. A. Vasil'ev, V. V. Oficerov, V. F. Rubahin. M.: Voenizdat, 1970. 401 s. (In Russ.).

3. Zarakovskij G. M. Psihofiziologicheskij analiz tru- dovoj dejatel'nosti (logiko-verojatnostnyj podhod pri izuchenii truda upravljajushhego tipa). M.: Nauka, 1966. 114 s. (In Russ.).

4. Suhodol'skij G. V. Strukturno-algoritmicheskij analiz i sintez dejatel'nosti. L.: LGU, 1976. 120 s. (In Russ.).

5. Gubinskij A. I., Evgrafov V. G. Jergonomicheskoe proektirovanie sudovyh sistem upravlenija. L.: Su- dostroenie, 1977. 224 s. (In Russ.).

6. Informacionno-upravljajushhie cheloveko-mashin- nye sistemy: issledovanie, proektirovanie, ispytaniya: spravochnik / A. N. Adamenko, A. T. Asherov, I. L. Berd- nikov, A. I. Gubinskij, V. G. Evgrafov. M.: Mashinostroenie, 1993. 528 s. (In Russ.).

7. Kobzev V. V., Shilov A. K. Modelirovanie tehnolo- gicheskogo processa na osnove mnogomernyh funkcion- al'nyh setej // Sistemy upravlenija i obrabotki informacii: nauch.-tehn. sb. / AO «Koncern NPO «Aurora». SPb. 2021. Vyp. 3(54). S. 64–70. (In Russ.).

8. Paderno P. I. Algoritmy dejatel'nosti – opisanie i ocenka // Chelovecheskij faktor. Ser. Problemy psihologii i jergonomiki. 2015. № 3. S. 37–40. (In Russ.).

9. Nazarenko N. A., Paderno P. I., Sattorov F. Je. Sposob ocenki logicheskoy slozhnosti i stereotipnosti algoritmov dejatel'nosti operatorov // Nauch.-tehn. vest- nik informacionnyh tehnologij, mehaniki i optiki. 2019. T. 19, № 4. S. 740–746. (In Russ.).

10. Nazarenko N. A., Paderno P. I. Tablichnyj metod ocenki logicheskoy slozhnosti i stereotipnosti algoritmov dejatel'nosti operatora // Sistemy upravlenija i obrabotki informacii: nauch.-tehn. sb. / AO «Koncern NPO «Avro- ra». SPb. 2023. Vyp. 2(57). S. 70–76. (In Russ.).

11. Nazarenko N. A., Paderno P. I. Ocenka logicheskoy slozhnosti i stereotipnosti ciklicheskih struktur v algorit- mah dejatel'nosti operatora // Izv. SPbGJeTU «LJeTI». 2020. № 1. S. 52–60. (In Russ.).

---

### Information about the authors

**Mokhtar A. M. Amran** – postgraduate student of the Department of Information Systems of Saint Peters- burg Electrotechnical University.

E-mail: mokhtar2011@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0006-5045-9778>



**Pavel I. Paderno** – Dr Sci. (Eng.), Professor of the Department of Information Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University. Honored Worker of Science of the Russian Federation.

E-mail: [pipaderno@list.ru](mailto:pipaderno@list.ru)

<https://orcid.org/0000-0001-9032-5084>

Статья поступила в редакцию 09.01.2024; принята к публикации после рецензирования 13.02.2024; опубликована онлайн 23.04.2024.

Submitted 09.01.2024; accepted 13.02.2024; published online 23.04.2024.

---