

# НОРМАТИВНЫЕ АСПЕКТЫ УНИФИКАЦИИ СРЕДСТВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Юркевич Е.В., Крюкова Л.Н.

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия*

*Yurkevitch.evgenij@yandex.ru, Lidkryukova@yandex.ru*

*Аннотация. Предложен методологический подход к обеспечению надежности системы технологических операций в соответствии с нормами, определяющими унификацию функциональных блоков производственной линии. Учитывая содержание трудового процесса, а также особенности работы функциональных блоков, предлагаемый подход рассматривается как основа обеспечения эффективности профильных стандартов технологической систем.*

*Ключевые слова: цифровые производства, технологическая система, информационный блок, унификация, SMART-документы, функциональная надежность.*

## Введение

В крупных компаниях, с целью обеспечения функциональной надежности цифровых технологий, существует практика заказывать разработку проектов специализированных информационных блоков (ИБ) технологических систем в отдельном подразделении или на специализированном предприятии. В связи с технологической важностью таких работ и широтой использования интеллектуальных средств обеспечения устойчивости работы технологических линий, ставится задача формирования подхода, позволяющего минимизировать риски в интеграции работы ИБ в основной проект (ОП), созданный в подразделении, функционально несвязанном с разработчиками ИБ.

Для решения такой задачи предлагается подход, основанный на унификации ИБ обеспечивающих функциональную надежность ОП. В применении к технологической системе этот подход аналогичен формированию генома, ориентированного на алгоритмизацию информационного содержания требований, определяющих согласование работы ИБ с функциональными характеристиками ОП.

В данной работе такое согласование предлагается строить в соответствии с нормами профильных функциональных стандартов, регламентирующих комплексные характеристики технологического процесса [1]. Термин «функциональный стандарт» понимается как нормативный документ, который при заданной структурной схеме технологии построения ОП регламентирует нормы, определяющие реакции ИБ на внешние воздействия.

Исходя из опыта построения технологических систем, будем полагать, что оценка эффективности применения профилей стандартов зависит от согласованности требований к характеристикам ИБ и норм, определенных в регламентах и стандартах на разрабатываемые ОП.

В связи с разнородностью технологий различных ОП, важным условием согласованности является наличие механизмов, регламентирующих введение в один проект норм, определенных в различных стандартах. Современные производственные возможности допускают разнообразие используемых технологических приемов, поэтому представляется весьма перспективным обращение к SMART-стандартам [2].

В данной задаче нормы, определяющие информационное содержание искомого генома, выявляются на основании анализа требований к технологическим процессам. Фактически, SMART-стандарты рассматриваются как контейнеры, содержащие данные, регламентирующие условия реализации конкретной технологии. Такой подход предполагает:

- обоснование разработки профиля функциональных стандартов, нормы которых должны определять границы применимости технологического процесса, для которого сформирован профиль;
- формирование перечня нормативных ссылок на набор базовых стандартов, регламентирующих идентификацию текстов базовых спецификаций профиля;
- определение спецификаций применения каждого цитируемого базового стандарта, устанавливающих выбор классов, подмножеств, опций, диапазонов значений параметров данного технологического процесса.

Испытания на надежность технологии ОП предполагают оценку функциональной полноты использования возможностей ИБ согласно параметрам, заложенным в техническом задании на разработку такого блока. В качестве важнейших составляющих процедуры такой оценки обычно принимается анализ результатов испытаний *hardware*, просмотры (обзоры) *software*, и тестирование выполнения требований, определенных в техническом задании [2].

Будем полагать, что для организации испытаний требуется определить геном взаимодействия ИБ и ОП, характеризуемый параметрами, влияющими на функциональную надежность ОП. Унификация характеристик ИБ позволит регламентировать динамику их значений, обеспечивая получение результатов ОП с вероятностью, определенной в техническом задании на его разработку.

Следует учитывать, что проблема обеспечения функциональной надежности является комплексной. Предлагаемый нами экспертно-аналитический подход формирования генома согласования работы ИБ и ОП позволяет оценивать риски реализации ОП не только в зависимости от конструктивных характеристик ИБ, но и от учета их технологичности, а также экономических факторов, например, от трудоемкости производства, форм организации труда и др.

## **1. Алгоритм выявления информации, определяющей регламентацию условий функциональной надежности ИБ в технологической линии ОП**

Факторы, определяющие геном взаимодействия ИБ и ОП, предлагается рассматривать на основе информации, получаемой в результате мониторинга характеристик технологических линий ОП. С помощью нейронных сетей проводились последовательные оценки затрат ресурсов на каждом из технологических этапов работы ОП, включая разработку тестовых сценариев, а также спецификаций и просмотров программного обеспечения. Оценивалась вероятность возникновения отказов ОП при невыполнении требований к системным связям, или при низких оценках их пригодности для тестирования.

На основе построения графов [3] предлагается механизм оценки существенности характеристик, определяющих функциональную надежность работы ОП. Существенной предложено называть характеристику, для которой зависимость между динамикой ее значений и изменением риска не достижения цели ОП не имеет отрицательных производных.

Анализ заказов от ряда подразделений компании на сходные по функционалу ИБ, показал, что каждый из проектов интеграции ИБ в ОП, имея свою направленность, характеризуется одними и теми же этапами жизненного цикла. На каждом из таких этапов строится цепь технологических операций, а каждая операция характеризуется фиксированным порядком действий исполнителя.

Для рассмотрения информации, определяющей геном согласования с ОП, были построены графы операций для всех видов применения ИБ. Направленность этих графов определялась целями построения ОП, а организация труда разработчиков ИБ оценивалась затратами ресурсов. Для каждого проекта был предложен свой граф, где узел определял конкретную операцию, а ветвь, соединяющая два узла, затраты соответствующего ресурса. В нашем случае они характеризовались трудоемкостью операции. В качестве пути рассматривался граф введения ИБ в ОП, образованный последовательными ветвями.

Для оценки существенности характеристик искомого генома нами использовались простые эквивалентные преобразования графов, позволяющие заменить последовательные и параллельные пути отдельными ветвями (например, преобразование звезды в треугольник с помощью исключения одного узла), а также решение систем уравнений, соответствующих построенным графам.

Достоинством предлагаемого алгоритма является простота оценки вероятности безотказной работы (ВБР) ОП через расчет надежности контуров обратной связи. В графе, характеризующем интеграцию ИБ, такие контуры могли быть двух видов: контур как замкнутый путь, состоящий из ряда ветвей, возвращающихся в исходный узел, и контур, состоящий из одной замкнутой ветви, образующей петлю.

В связи с тем, что при оптимизации контуров обратной связи использовалась неструктурированная информация, преобразования графов проводились на основании экспертных заключений. В конечном итоге был сформирован механизм, позволяющий находить точки, определяющие наиболее рациональную схему интеграции ИБ в технологию работы ОП в зависимости от трудоемкости операций по введению ИБ в ОП. Таким образом, для анализа ВБР ОП в каждом из путей на построенном графе рассматривались характеристики процессов, возникающих независимо от действий разработчика (кроме ошибочных действий). Давалось заключение, могли ли эти процессы приводить к недопустимому риску несоответствия требованиям, заложенным в техническом задании на разработку ОП.

Определим, что каждое несоответствие требованиям, установленным таким заданием, будем называть дефектом. Соответственно, бездефектное состояние ОП должно определяться требованиями, установленными нормами в функциональных стандартах.

Важным фактором, влияющим на надежность согласования ИБ и ОП, является наличие явных и скрытых дефектов. Явные дефекты обнаруживались проверкой на соответствие нормам, предусмотренным документацией. Остальные дефекты (скрытые) можно было обнаружить, если

применять непредусмотренные документацией средства контроля. Такое положение накладывает дополнительные требования к методам анализа результатов проверки ОП на функциональную надежность.

Другой особенностью явились различия в последствиях, к которым может привести наличие того или иного дефекта. Если его наличие исключало использование результатов ОП по назначению из-за несоответствия нормативным требованиям по функциональной надежности, то такой дефект (или дефекты) рассматривался как критический. Результаты разработки ОП с малозначительными дефектами могли использоваться по назначению, и их наличие не влияло на возможность результатов проекта (этапа или операции) выполнять свои функции. Поэтому в дополнение к традиционным оценкам состояния (бездефектное и дефектное) для ОП были введены понятия «работоспособное» и «неработоспособное». Работоспособным названо состояние, при котором в результате введения ИБ, сохраняется возможность выполнять функции, определенные техническим заданием, при этом значения контролируемых параметров остаются в пределах, установленных нормативными документами.

В данном рассмотрении узлы графа, характеризующие переходом результатов ОП из «работоспособного» состояния в «неработоспособное», были названы критическими точками.

Согласно нашей задаче в качестве бракующего условия было принято наличие дефекта, определяемого соответствующими критическими точками. Анализ условий их возникновения показал, что дефекты могут появляться при событии, называемом «помеха». Однако несущественная помеха может не повлиять на работоспособность ОП, но существенная приводит к нарушению его работоспособности. В общем случае критические точки предлагается фиксировать как результаты внешних воздействий и/или внутренних процессов, обуславливающих возникновение соответствующих дефектов.

Причины возникновения дефектов в геноме взаимосвязи ИБ и ОП проявляются при сопоставлении результатов тестирования работы ОП с нормами, определенными в функциональных стандартах. В этой связи информационное обеспечение искомого генома предлагается строить в виде трех частей (А, Б, В):

- часть А – совокупность критических значений существенных характеристик, введенных в документацию на ОП, согласно внутренним документам, принятым у разработчика. Несоответствие нормативному обеспечению в части А, предполагает необходимость испытаний на наличие скрытых дефектов, существенность которых определит появление критической точки;
- часть Б – перечень характеристик, составленный на основе внутренних документов компании, с целью установления соответствия результатов использования ИБ требованиям заказчика. Соответствие параметров ОП положениям нормативных документов в части Б является необходимым условием бездефектности, но требуется проверка ИБ на работоспособность;
- часть В – ОП в полной мере соответствует нормам национальных и международных нормативных документов с точки зрения формирования «существенных требований» к согласованию с характеристиками ИБ. Несоответствие нормам, определенным в стандартах, является достаточным условием для появления критической точки.

В целом, документация, определяющая технологию введения ИБ, должна строиться на базе сочетания оценок функциональной надежности как для всего ОП в целом, так и на уровне этапов его разработки. Согласно развиваемому нами подходу требования к обеспечению функциональной надежности ОП предлагается формировать на трех уровнях жесткости [4]:

- при минимальных требованиях уровень характеризуется, исходя из положений, прописанных в нормативной документации. Этим требованиям должны отвечать результаты, определенные документацией на ИБ, на каждом этапе разработки ОП;
- при средних требованиях уровень характеризуется, исходя из значений параметров ИБ, установленных заказчиком данного ОП при максимальных значениях внешних воздействующих факторов, или на этапе разработки, характеризуем наибольшей чувствительностью к воздействию внешних факторов;
- при максимальных требованиях уровень характеризуется подобно «среднему» уровню, но из расчета форс-мажорных воздействий на наиболее чувствительных этапах разработки ОП.

Применительно к обеспечению ВБР ОП в предлагаемом подходе уровень жесткости выбирается с ориентацией на аспекты экономической значимости использования данного проекта. В соответствии с информацией, содержащейся в матрице уровня полноты безопасности, определенной стандартом S84.01 (три нижних уровнями МЭК 61508, применяемыми для программно-технических средств) были введены требования соответственно:

- для малой величины риска – «нулевой» уровень жесткости;
- для средней величины риска – «первый» уровень жесткости;
- для высокой величины риска – «второй» уровень жесткости.

Итак, если определены критические точки в организации разработки ОП, а также жесткость задания его ВБР, то задача согласования характеристик ИБ и ОП приобретает вид установления допусков отклонений от заданных значений этих характеристик и их оценок. Практика реализации таких проектов показывает, что требования, заложенные в неоправданно детализированную документацию, не только увеличивают стоимость работ, но при этом возрастает вероятность ошибки ( $\alpha$ ), определяемой долей ухода в брак работоспособных ИБ. С другой стороны, слишком малая детализация проработки проектной документации повышает вероятность ошибки ( $\beta$ ), определяемой долей использования негодных ИБ, и возникшими в результате этого экономическими потерями.

Для приведения результатов работы в соответствие с характеристиками, требуемыми в техническом задании, была поставлена задача определения степени детализации в проработке технической документации [5]. В этом случае в качестве целевой функции разработчика (Р) ОП была принята максимизация прибыли в сочетании с выполнением его договорных обязательств перед заказчиком (З). Естественно полагать, что такой максимум достигается минимизацией суммарных трудозатрат на разработку ОП при минимизации вероятности информационного искажения в случае устранения в брак исправного ИБ или не устранения средства бракованного.

Статистика показала, что трудоемкость работ ( $T_p$ ) может быть записана:

$$T_p(t) = F((\sum T_{To}), \alpha, \beta, f(t)), \quad (1)$$

где  $\sum T_{To}$  – сумма трудоемкостей каждой из технологических операций ИБ,

$f(t)$  – плотность распределения вероятностей ВБР,

$t$  – коэффициент уровня проработки документации; на каждый тип ИБ экспертно назначается своя шкала, фиксируемая в документации компании.

Качественно статистическая зависимость трудозатрат ( $T_p$ ) на разработку ОП от уровня проработки нормативной документации ( $t_{\text{док}}$ ) представлена на рисунке 1

В результате такой оценки данных можно видеть, что функция  $T_p(t)$  имеет ярко выраженный экстремум, определяющий минимальную величину трудозатрат на проработку документации ОП.

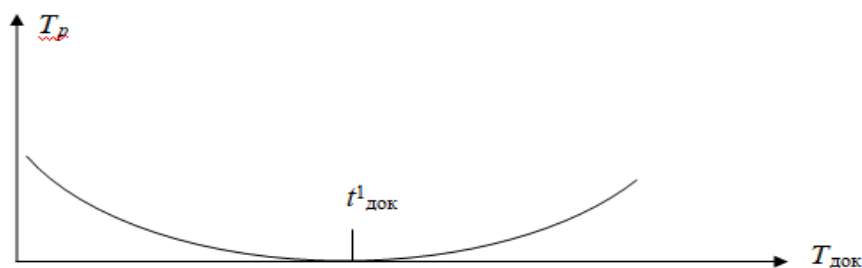


Рис. 1. Зависимость трудозатрат ( $T_p$ ) на разработку ОП от уровня проработки нормативной документации ( $t_{\text{док}}$ )

Желание заказчиков осваивать результаты разработки ИБ повышается с повышением  $t_{\text{док}}$ . Однако, разработчики, не желая тратить лишние средства, останавливаются в отработке предлагаемых ими решений. Следовательно, требуется оценка приближения уровня проработки документации к точке  $t_{\text{док}}^1$ . Оптимизация этого процесса может проводиться, исходя из «профессиональных требований полноты результатов разработки», например, нормативного обеспечения *software*.

Согласно нашей задаче, результат создания ОП будем считать «работоспособен», если параметры его функциональной надежности соответствуют значениям, установленным допусками в соответствующих нормативных документах.

Пусть имеется  $n$  параметров, характеризующих организацию работ на некотором этапе создания ОП. В этом случае динамику его ВБР можно представить вектором в  $n$ -мерном пространстве. Разброс в значениях таких параметров определит область работоспособности данного ОП ( $D$ ). Каждая внутренняя точка этой области будет соответствовать работоспособному результату. Практика использования этого подхода показывает, что из-за статистического разброса параметров положению каждого реального вектора геометрически будет соответствовать не одна точка, а некоторая область

$Q$ . Если область  $Q$  не пуста, то с вероятностью  $P_6$  может иметься несоответствие ИБ. Определение величины  $P_6$  и назовем статистической оценкой ВБР ОП. В этом случае задача оптимизации генома согласования ТБ и ОП сводится к минимизации  $P_6$  или (что аналогично) к максимизации процента получения работоспособных результатов использования ИБ.

Допустим, что имеются значения заданных допусков, ставится задача найти организационные условия, при которых получается наибольший процент работоспособных результатов, при том, чтобы среднее значение параметров (условий, заданных в нормативных документах) не выходило за область работоспособности  $D$ . В практических задачах такой алгоритм реализовался методом Монте-Карло.

В начале, каким-либо образом (случайно) задавалось математическое ожидание вектора интересующих нас параметров. Естественно, что это задание может оказаться неудачным в том смысле, что часть результатов разработки этапа, после проведения  $N$  тестирований окажется вне области работоспособности  $D$ . Однако особенностью данного алгоритма является то, что, хотя бы один из результатов должен быть годным. По значениям параметров, которые соответствуют годным результатам, находилось их среднее значение. И уже на следующем шаге оптимизации случайные параметры генерировались с найденным математическим ожиданием. Эта процедура повторялась до тех пор, пока не достигался процент годных результатов, определенный в задании на разработку ОП.

В целом, методы поиска критических точек можно свести к построению «деревьев дефектов», т.е. соответствующих графов, позволяющих построить все этапы создания ОП с помощью соответствующих узлов и ветвей. Вместе с тем, для таких разработок имеется значительная специфика нахождения этапов, представляющих наибольшую потенциальную опасность, т.е. критических точек на графе. Такая опасность выражается в неопределенности взаимозависимостей параметров на отдельных этапах. Это может значительно усложнить поиск критических точек и сделать неприменимым методы «деревьев дефектов».

В таких случаях может быть рекомендован метод «причин и последствий отказов», который позволяет учесть ущерб от несоответствия требованиям надежности в критических точках. Суть этого метода состоит в требовании регулярной идентификации последствий дефектных состояний ИБ на каждом этапе разработки ОП. Это индуктивный метод, основанный на вопросе «что случится, если...?». Он является описательным и организуется в форме составления таблицы или рабочего листа. Метод рассматривает дефектные состояния ОП с анализом характеристик ИБ, являющихся причинами возникновения этих состояний и воздействий на надежность данного ОП.

В результате таких испытаний должны быть подтверждены:

- функции ИБ и оценки вероятности их выполнения;
- требования по функциональности, эффективности и качеству разработанного ИБ;
- формулировки каждого из требований как точного (однозначного) с гарантией того, что эти требования не конфликтуют друг с другом;
- обоснования отсутствия конфликтов между требованиями к программному обеспечению и к возможностям аппаратных средств, на которых оно реализуется;
- гарантии того, что процессы разработки требований к функционированию данного ИБ полностью соответствуют стандартам на создание спецификаций требований [6], а какие-либо отклонения от них неизбежны;
- обоснования того, что функциональные и конструктивные характеристики ИБ включены в требования к ОП.

Предлагаемый подход к испытаниям ИБ основан на оценке используемых тестов. Следовательно, задача разработки функциональных стандартов на создаваемый ОП решается с помощью регламентации условий, оцениваемых по сопоставлению результатов испытания характеристик с результатами испытания тестов, включающих в себя сочетание сценариев тестирования с процедурами и результатами работы ИБ.

## **2. Методологические аспекты обеспечения функциональной надежности ОП с помощью введения в техническую линию унифицированных ИБ**

Необходимость в регулярном контроле технического состояния (ТС) ОП, требуемого заказчиком, определила актуальность формирования алгоритма, оценки результатов испытаний ИБ на соответствие нормам, определенным в функциональных стандартах. Такая диагностика не всегда возможна из-за динамики значений контролируемых параметров в зависимости от динамики условий использования ОП и представления экспертных данных в виде лингвистических переменных [7].

Строгость положений, прописанных в нормативных документах, определила необходимость принятия наиболее жестких условий работы ОП. Будем полагать, что если введение ИБ в ОП определяет значения параметров технологической линии как приближающиеся к критическим, то отклонения от штатного режима работы требуют корректировку конструктивных решений.

В данном рассмотрении в качестве критерия оценки ТС ОП предлагается коэффициент функциональной готовности к выполнению заданных технологических функций [8]. Ограничением в использовании этого критерия являются результаты мониторинга реакций ИБ на воздействия внешних и внутренних факторов в течение фиксированного времени. За характеристику таких реакций предлагается принимать расчет надежности ИБ, традиционно получаемый на основе оценки нижних односторонних доверительных границ (НДГ) вероятности его безотказной работы (ВБР) с уровнем доверия, заданным в нормативных документах.

Согласно предлагаемому подходу строгость контроля испытаний будем оценивать в два этапа. На первом этапе проводится контроль адекватности значений характеристик ОП, полученных на комплексных испытаниях. Для этого оцениваются реакции ИБ на воздействия внешних факторов в течение фиксированного времени. Унификация конструктивных решений позволяет принять, что на сходные воздействия различные (ИБ, разработанные для различных технологических линий) реагируют одинаково. На втором этапе оценивается соответствие вложения ресурсов в контроль ТС ОП нормативным положениям функциональных стандартов.

В соответствии с задачей формирования генома введения ИБ в ОП показатель ТС ОП предлагается рассматривать и как оценку оперативной функциональной готовности ИБ, определяющую вероятность достижения цели его использования в изменяющихся условиях. В формульном выражении характеристика ТС ОП, методологически наиболее близкая положениям ГОСТ 15467-79, выражается как относительный показатель:

$$(K_{i\phi} - K_{i\sigma})/K_{i\sigma}$$

где  $K_{i\phi}$  – фактическое значение  $i$ -го показателя ТС ОП, при  $i = 1, 2, \dots, n$ ;

$K_{i\sigma}$  – определенное в стандарте (базовое) значение  $i$ -го показателя ТС ОП при  $i = 1, 2, \dots, n$ .

В зависимости от цели оценки ТС базовые значения показателей выбираются по таблице 1.

Таблица 1. Базовые значения показателей ТС ИБ

Цель оценки ТС ИБ	Базовые значения показателей ТС ИБ
Обоснование параметров новых ИБ, подготовка технического задания на разработку, регламента, НТД, технических условий	Установленные при прогнозировании параметров, разрабатываемых и/или подлежащих поставке на производство новых ИБ
Принятие решения по результатам испытания разрабатываемых ИБ	Установленные техническим заданием на разработку испытуемых ИБ
Принятие решения по результатам приемочного контроля изготовленного ИБ	Установленные регламентом, стандартами и техническими условиями на изготавливаемые ИБ.
Входной контроль	Занесенные в приложение к договору о разработке ИБ
Плановый мониторинг	Установленные регламентом, стандартами и техническими условиями на эксплуатируемые ИБ
Принятие решения по результатам ремонта ИБ	Установленные регламентом, стандартами и техническими условиями на отремонтированные ИБ

Оценка ТС ИБ состоит из следующих этапов:

- выбор номенклатуры показателей ТС;
- обоснование необходимости и достаточности выбранных показателей;
- выбор и разработка методов определения значений показателей ТС;
- выбор базовых значений показателей ТС и исходных данных для определения фактических значений показателей ТС;
- определение фактических значений показателей ТС и их сопоставление с базовыми;
- сравнительный анализ возможных условий разработки, производства, транспортировки и эксплуатации средств и нахождение наилучших ИБ;
- обоснование рекомендаций для принятия управленческих решений.

Цель каждой из оценок обуславливает выбор номенклатуры показателей ТС, а также обоснование необходимости и достаточности выбранных показателей, которые следует использовать для рассмотрения. Методы и точность определения оценок, а также средства их проведения, методики обработки и формы представления результатов определяются наперед поставленными задачами. Варианты возможных решений, которые следует сравнивать между собой, являются обоснованием предлагаемых рекомендаций.

Преимуществом описанного подхода является возможность использования существующей инфраструктуры сбора данных, а также возможность применения адресности работы каждого ИБ, даже если он находится в нерабочем состоянии. В результате, на основании предлагаемых механизмов, возможна своевременная диагностика изменения параметров работы разрабатываемого ОП на раннем этапе развития реакции ИБ на воздействия внешних факторов [9].

Будем полагать, что ВБР ОП может быть вычислена в любой произвольный момент времени при использовании каждого из ИБ отдельно. Ввиду того, что заранее известна проектная оценка ОП, следовательно, и его структурная схема надежности (ССН), становится возможным рассматривать функцию от времени  $p(t)$  как условную вероятность успешного завершения испытания ОП с конкретным ИБ и получать ее значения для любого произвольного момента времени.

Обозначим функцию динамики значений ВБР ОП, зависящей от его текущего состояния ССН и его нормативного срока существования (СС); как  $f(T, t)$ , где  $T$  – время СС,  $t$  – текущее время.

Теперь для имеющегося множества  $n$  ИБ, может быть получен вектор ВБР на полный СС  $p(t)$ , координаты которого характеризуют ОП с каждым ИБ, включенным в его состав:

$$p(t) = \begin{cases} 1 & \text{если испытания ИБ завершены успешно} \\ f(T, t) & \text{в процессе испытания ИБ} \\ P_0 & \text{до начала испытаний ИБ} \end{cases}, \quad (2)$$

где  $f(T, t)$  – функция значения ВБР ИБ, зависящая от его текущего состояния ССН и его нормативного срока существования (СС);

$T$  – время СС.

Используя формулу (2) для системы из  $n$  ИБ, может быть получен вектор ВБР на остаточный СС  $\mathbf{p}(t)$ , координаты которого характеризуют каждый ИБ в составе ОП:

$$\mathbf{p}(t) = [p_0(t) \quad p_1(t) \quad \dots \quad p_n(t)]. \quad (3)$$

Учитывая результаты комплексных испытаний всего разрабатываемого ОП, этот вектор предлагается использовать в качестве исходного для вычисления вектора вероятностей исходов в работе ИБ:

$$\mathbf{B} = [B_0, B_1, \dots, B_n]. \quad (4)$$

Координаты вектора вычисляются в соответствии с правилами комбинаторного перебора, например:

$$\begin{aligned} B_0 &= p_0(t) \cdot p_1(t) \cdot \dots \cdot p_n(t) \\ B_1 &= (1 - p_0(t)) \cdot p_1(t) \cdot \dots \cdot p_n(t) + p_0(t) \cdot (1 - p_1(t)) \cdot \dots \cdot p_n(t) + \dots \\ &\quad + p_0(t) \cdot p_1(t) \cdot \dots \cdot (1 - p_n(t)) \\ B_n &= (1 - p_0(t)) \cdot (1 - p_1(t)) \cdot \dots \cdot (1 - p_n(t)). \end{aligned} \quad (5)$$

В данном алгоритме предлагается оценивать значения каждой координаты вектора  $\mathbf{B}$  с помощью расчета условной вероятности наступления события, характеризующей конкретное количество отказов. Отметим, что эта оценка может быть дана для произвольного момента времени.

Для решения прикладных задач ниже приводится листинг кода программы-прототипа на языке *Python*, результатом которого является сформированный вектор  $\mathbf{B}$ :

```
def Binom(List):
    B = []
    k = len(List)
    for i in range(k+1):
        B.append(0)
    for i in range(2**k):
        c, p = 0, 1
```

```

for j in range(k-1,-1,-1):
    t = 1&(i>>j)
    c += t
    p *= List[j-1] if t else 1 - List[j-1]
B[k-c] += p
return B

```

Например, для исходных данных:

[0.9 0.9 0.81 0.91 0.83 0.93 0.93 0.95]

будет сформирован вектор:

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0.407173050 & 0.392384408 & 0.159435101 \\ 0.035735145 & 0.004843527 & 0.000407375 \\ 0.000020797 & 0.000000590 & 0.000000007 \end{bmatrix}.$$

Будем полагать, что в функциональном стандарте на ИБ определены Байесовские оценки нижней допустимой границы (НДГ) количества возможных отказов. В этом случае вектор  $B$  будем рассматривать как характеристику условных вероятностей наступления событий, соответствующих каждому из теоретически возможных отказов.

Особенностью такого подхода является тот факт, что к моменту завершения испытаний математическое ожидание оценки НДГ ВБР будет асимптотически стремиться к одному из значений координаты вектора, то есть в конечном счете результат сойдется с тем значением, которое может быть получено «классическим» методом байесовского оценивания.

На рисунке 2 показаны графики изменения оценки НДГ ВБР, получаемые предложенным методом, в зависимости от момента времени оценки в период (0 – 50000) с.

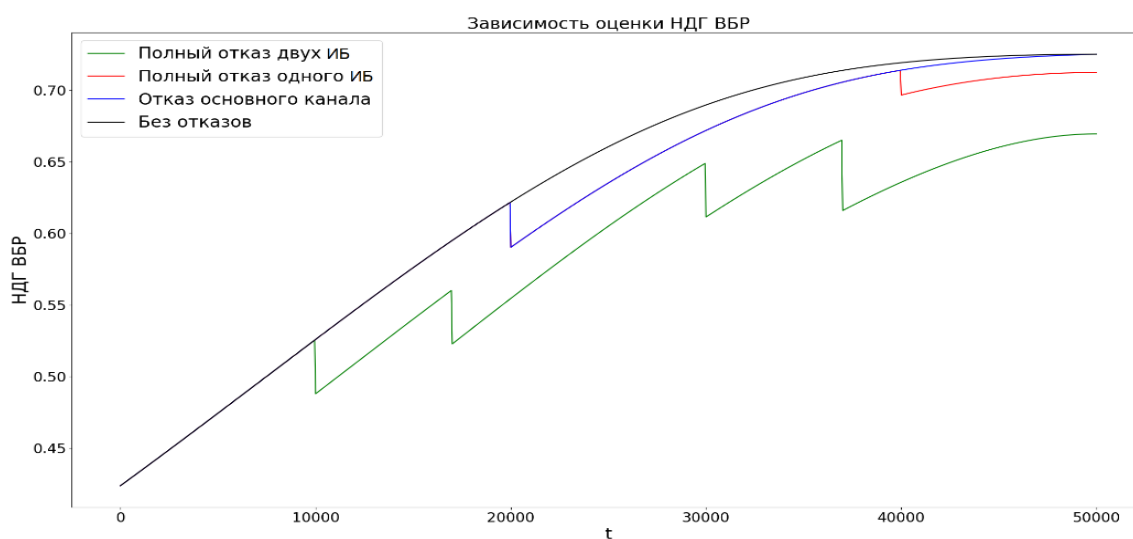


Рис. 2. Зависимости оценки НДГ ВБР от времени для случаев отказов ИБ

Как видно из рисунка 2, в моменты отказов элементов ССН ИБ графики претерпевают скачкообразные изменения, но продолжают асимптотическое стремление к конкретным значениям оценок. Предлагаемый алгоритм расчета байесовских оценок НДГ ВБР ИБ для произвольного момента времени можно считать математически непротиворечивым. Такие оценки, введенные в функциональные стандарты, являются характеристикой генома, определяющего применимость ИБ в ОП до полного завершения испытаний данного ОП в целом.

### 3. Заключение

С целью стабилизации работы сложной технологической системы при выпуске ее однотипных блоков различными производствами предлагаются алгоритмы формирования генома, определяющего условия обеспечения функциональной надежности введения ИБ в ОП. Базой для формирования этих условий являются предложенные оценки НДГ ВБР ИБ с использованием метода байесовского оценивания при частичной априорной определенности  $B$  отличие от «классического» предложенный подход дает возможность согласовывать нормативы, определенные в функциональных стандартах с



характеристиками ИБ и ОП до окончания испытаний, например, в произвольный момент времени в процессе эксплуатации.

Анализ функциональной надежности программного обеспечения в реализации ОП позволил оценивать эффективность организационно-экономических условий введения ИБ в технологические линии. При этом оптимизация глубины проработки документации на программно-технические средства определила возможности максимизации надежности ИБ. Использование нормативов условий для проведения таких разработок должно привести к существенной экономии ресурсов. Так, стоимость одного автоматизированного рабочего места определяется сотнями тысяч рублей и, если не вести экономически целесообразную политику в области информационного обеспечения, эта цифра может возрасти в несколько раз. Предложенный подход не требует специфических исходных данных и легко реализуем средствами математического программирования.

## Литература

1. *Юркевич Е.В., Кофанов Ю.Н., Старостин А.К.* Нормативное обеспечение техники автоматизации. – М.: ООО «Азбука-2000», 2003. – 200 с.
2. *Юркевич Е.В., Крюкова Л.Н.* Проблемы нормативного обеспечения функциональной безопасности работы организационно – технологических систем // труды Второй междунар. конф. по проблемам управления. М: ИПУ РАН, 2006.
3. *Берж К.* Теория графов и ее применение. Пер. с франц. под ред. И.А. Вайнштейна. – М.: «Иностранная литература», 1962. – 318 с.
4. *Агафонов А.А. Юмаганов А.С.* Безопасность систем баз данных: учебное пособие. – Самара: изд. Самарского университета, 2023. – 272 с.
5. *Юркевич Е.В., Колосов Б.В.* Функциональная надежность в малом предпринимательстве /изд. 2-е исправленное и дополненное. – М.: МАКС-пресс, 2011. – 330 с.
6. *Юркевич Е.В., Крюкова Л.Н.* Проблемы регламентации функциональной надежности средств измерений и управления в промышленных процессах // Измерительная техника. 2013. № 1. С. 19–23.
7. *Савчук В.П.* Байесовские методы статистического оценивания. Надежность технических объектов. – М.: «Наука». 1989. – 322 с.
8. *Натан А. А., Горбачев О. Г., Гуз С.А.* Математическая статистика / учеб. пособие. – М.: МЗ Пресс – МФТИ. 2004. – 160 с.
9. *Сухорученков Б.И.* Анализ малой выборки. Прикладные статистические методы. М.: «Вузовская книга», 2010. – 384 с.