

СОДЕРЖАНИЕ

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПРОБЛЕМ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА

Абрамов О. В.

О ВЫБОРЕ СТРАТЕГИИ ОПТИМАЛЬНОГО ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА В САПР 5

Каштанов В. А., Зайцева О. Б.

К ПРОБЛЕМЕ СИНТЕЗА УПРАВЛЯЕМЫХ МОДЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ
И БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ОГРАНИЧЕНИЯХ НА СТРАТЕГИИ УПРАВЛЕНИЯ 13

Putilov V.A., Masloboev A.V.

STATE-OF-THE-ART OF THE MANAGEMENT INFORMATION INFRASTRUCTURE
OF ARCTIC REGION DEVELOPMENT: CHALLENGES, TRENDS AND LIMITATIONS 24

Зеленцов Б. П.

УКРУПНЕНИЕ СОСТОЯНИЙ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ НАДЕЖНОСТИ
ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ МАРКОВСКИМИ ПРОЦЕССАМИ 36

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ

Лузгина О. Н., Москалев С. А., Недопекин Н. В., Новоселов А. С., Папко А. А., Поспелов А. В.

О ВОЗМОЖНОСТЯХ ВЫБОРА МЕТОДА ОЦЕНКИ ДРЕЙФОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ВОЛНОВЫХ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ГИРОСКОПОВ ГЕ 006 НА ОСНОВЕ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ПОДТВЕРЖДЕНИЯ 53

Панкин А. М.

ОСНОВНЫЕ ВОПРОСЫ МЕТОДОЛОГИИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ
СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ 62

Ильин А. С.

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ
СИСТЕМЫ ПОВЕРКИ КИЛОВОЛЬТМЕТРОВ 70

Meľnichuk A.I., Goryachev N.V., Yurkov N.K.

COMPUTER-AIDED DESIGN OF THE VIVALDI ANTENNA FOR ULTRA-WIDEBAND
ELECTROMAGNETIC PULSE RADIATION 78

Денисова О. М., Боронин К. М., Ларин Т. В.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПРОЦЕНТНОГО СОДЕРЖАНИЯ
РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ УГЛЕРОДА К ПОЛИЭТИЛЕНУ
В СОСТАВЕ ПОЛИМЕРНО-УГЛЕРОДНОГО КОМПОЗИТА 92

БЕЗОПАСНОСТЬ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

Самаров В. В.

ПРАКТИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ ПРОВЕДЕНИЯ СЕРТИФИКАЦИОННЫХ
ИСПЫТАНИЙ ПРОГРАММНЫХ ИЗДЕЛИЙ 99

Самаров В. В., Юрков Н. К.

ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ КОНТРОЛЯ ФАЙЛОВОЙ ИЗБЫТОЧНОСТИ
И ПОДТВЕРЖДЕНИЯ ПОЛНОТЫ ИСХОДНЫХ ТЕКСТОВ НА УРОВНЕ ФАЙЛОВ 104

RELIABILITY AND QUALITY OF COMPLEX SYSTEMS

№ 2 (34) 2021

CONTENT

FUNDAMENTALS OF RELIABILITY AND QUALITY ISSUES

Abramov O.V.

ON THE CHOICE OF AN OPTIMAL PARAMETRIC SYNTHESIS STRATEGY IN CAD 5

Kashtanov V.A., Zaytseva O.B.

ON THE PROBLEM OF SYNTHESIS OF CONTROLLED RELIABILITY MODELS
AND SECURITY UNDER RESTRICTIONS ON MANAGEMENT STRATEGIES 13

Putilov V.A., Masloboev A.V.

STATE-OF-THE-ART OF THE MANAGEMENT INFORMATION INFRASTRUCTURE
OF ARCTIC REGION DEVELOPMENT: CHALLENGES, TRENDS AND LIMITATIONS 24

Zelentsov B.P.

AGGREGATION OF STATES OF MARKOV PROCESSES BY MODELING
RELIABILITY OF TECHNICAL SYSTEMS 36

TECHNOLOGICAL BASIS FOR IMPROVING RELIABILITY AND PRODUCT QUALITY

Luzgina O.N., Moskalev S.A., Nedopekin N.V., Novoselov A.S., Papko A.A., Pospelov A.V.

ON THE POSSIBILITIES OF CHOOSING A METHOD FOR ESTIMATING
THE DRIFT CHARACTERISTICS OF GE 006 WAVE SOLID-STATE GYROSCOPES
BASED ON EXPERIMENTAL CONFIRMATION 53

Pankin A.M.

THE MAIN ISSUES OF THE DIAGNOSTIC METHODOLOGY COMPLEX TECHNICAL OBJECTS 62

Ilin A.S.

TECHNICAL MEANS OF PROTECTION INFORMATION-MEASURING SYSTEM
CALIBRATION OF KILOVOLTMETERS 70

Melnichuk A. I., Goryachev N. V., Yurkov N. K.

COMPUTER-AIDED DESIGN OF THE VIVALDI ANTENNA FOR ULTRA-WIDEBAND
ELECTROMAGNETIC PULSE RADIATION 78

Denisova O.M., Boronin K.M., Larin T.V.

STUDY OF THE DEPENDENCE OF THE PERCENTAGE
OF DIFFERENT TYPES OF CARBON TO POLYETHYLENE
IN THE COMPOSITION OF A POLYMER-CARBON COMPOSITE 92

SAFETY IN EMERGENCY SITUATIONS

Samarov V.V.

PRACTICAL ISSUES OF CONDUCTING CERTIFICATION TESTS OF SOFTWARE PRODUCTS 99

Samarov V.V., Yurkov N.K.

SOFTWARE IMPLEMENTATION OF FILE REDUNDANCY CONTROL AND CONFIRMATION
OF THE COMPLETENESS OF THE SOURCE TEXTS AT THE FILE LEVEL..... 104

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПРОБЛЕМ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА

FUNDAMENTALS OF RELIABILITY AND QUALITY ISSUES

УДК 681.5.015.63:62-192
doi:10.21685/2307-4205-2021-2-1

О ВЫБОРЕ СТРАТЕГИИ ОПТИМАЛЬНОГО ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА В САПР

О. В. Абрамов

Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения
Российской академии наук, Владивосток, Россия
abramov@iacp.dvo.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рассмотрены некоторые методологические проблемы принятия проектных решений, возникающие в процессе оптимального параметрического синтеза аналоговых технических устройств и систем с учетом стохастических закономерностей изменения их параметров и требований надежности. *Материалы и методы.* Обсуждаются основные особенности оптимизационных задач, возникающих в процессе параметрического синтеза. *Результаты и выводы.* Полученные результаты могут быть полезны при разработке алгоритмов параметрического синтеза, основанных на технологии параллельных вычислений.

Ключевые слова: технические устройства и системы, параметрический синтез, параллельный алгоритм, параметр, надежность, оптимизация

Для цитирования: Абрамов О. В. О выборе стратегии оптимального параметрического синтеза в САПР // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 2. С. 5–12. doi:10.21685/2307-4205-2021-2-1

ON THE CHOICE OF AN OPTIMAL PARAMETRIC SYNTHESIS STRATEGY IN CAD

O.V. Abramov

Institute for Automation and Control processes,
Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia
abramov@iacp.dvo.ru

Abstract. *Background.* Some methodological problems of making design decisions that arise in the process of optimal parametric synthesis of analog technical devices and systems, taking into account the stochastic laws of changing their parameters and reliability requirements, are considered. *Materials and methods.* The main features of optimization problems arising in the process of parametric synthesis are discussed. *Results and conclusions.* The results obtained can be useful in the development of parametric synthesis algorithms based on the technology of parallel computations.

Keywords: engineering devices and systems, parametric synthesis, parallel algorithm, parameter, reliability, optimization

For citation: Abramov O.V. On the choice of an optimal parametric synthesis strategy in CAD. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2021;2:5–12. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2021-2-1

Введение

Быстрое развитие алгоритмических и программных средств САПР сопровождается ускоренным распространением новых электронных форм проектирования, основанных на компьютерном моделировании и анализе. Такое виртуальное проектирование завоевывает все больше позиций у традиционного проектирования, снижая затратность и повышая производительность и качество проектирования [1]. Компьютерные модели и электронные прототипы изделий прочно вошли в практику САПР. Вместе с тем автоматизированное проектирование достигло наибольших успехов в основном в рутинных задачах разработки чертежной документации и в так называемых инженерных расчетах, где требуется высокая производительность стандартных вычислений. Значительно слабее достижения там, где принятие проектных решений связано с необходимостью многовариантного анализа и оптимизации. В частности, это относится к проблеме оптимального проектирования технических систем с учетом параметрических возмущений и требований надежности. Одной из важных задач схмотехнического проектирования является задача оптимального параметрического синтеза.

В общем виде задача оптимального параметрического синтеза технических устройств и систем с учетом стохастических закономерностей изменения их параметров и требований надежности (параметрического синтеза в широком смысле) состоит в поиске таких начальных (номинальных) значений параметров элементов системы (внутренних параметров), при которых обеспечивается максимальная вероятность выполнения условий работоспособности в течение заданного времени эксплуатации. При этом предполагается, что структура (топология) проектируемой системы и ее математическая модель известны [2, 3].

Функции, описывающие проектируемую систему, обычно имеют сложный нелинейный характер, что не позволяет получить оптимальное решение в аналитической форме с помощью классических методов дифференциального и вариационного исчисления. Для решения задачи оптимального параметрического синтеза (ОПС) приходится использовать алгоритмические поисковые методы.

Сложность решения задачи ОПС связана с высокой трудоемкостью алгоритмов ее решения, а также во многих случаях с дефицитом достоверной информации о закономерностях случайных процессов вариации параметров объекта синтеза. В этих условиях хотелось бы по возможности упростить процесс поиска конечного результата путем отказа от мало значимых действий, имеющих сомнительную практическую полезность. Эффективность стратегии решения задачи ОПС во многом будет зависеть от полноты учета специфики решаемой оптимизационной задачи. Остановимся на некоторых особенностях, возникающих в процессе ОПС оптимизационных задач.

Оптимизация по стохастическим критериям

Общая постановка задачи оптимального параметрического синтеза имеет следующий вид [2–4]. Найти номинальные значения внутренних параметров исследуемой системы $\mathbf{x}_{\text{ном}} = (x_{1\text{ном}}, \dots, x_{l\text{ном}})$, обеспечивающие максимум вероятности ее безотказной работы (ВБР) в течение заданного времени:

$$\mathbf{x}_{\text{ном}}^0 = \arg \max P\{\mathbf{X}(\mathbf{x}_{\text{ном}}, t) \in D_x, \forall t \in [0, T]\}, \quad (1)$$

где $\mathbf{X}(\mathbf{x}_{\text{ном}}, t)$ – случайный процесс изменения параметров; D_x – область работоспособности; T – заданное время эксплуатации системы.

Область допустимых вариаций внутренних параметров D_x , как правило, неизвестна, а условия работоспособности обычно задаются системой неравенств:

$$a_j \leq y(\mathbf{x})_j \leq b_j, \dots, j = 1, m, \quad (2)$$

где $\mathbf{y} = \{y_j\}_{j=1}^m$ – вектор выходных параметров системы, причем $y_j = F_j(x_1, \dots, x_n)$, а $F_j(\bullet)$ – известный оператор, зависящий от топологии исследуемой системы.

В качестве количественного показателя надежности принимается вероятность

$$P(\mathbf{Y}(t) \in D_y, \forall t \in [0, T]), \quad (3)$$

где $\mathbf{Y}(t)$ – случайный процесс изменения выходных параметров системы, а D_y – область допустимых изменений выходных параметров, которая чаще всего задается системой неравенств (2), а значит, имеет форму m -мерного гиперпараллелепипеда.

Таким образом, целевая функция $P(\mathbf{x}_{\text{ном}}, T) = P\{\mathbf{X}(\mathbf{x}_{\text{ном}}, t) \in D_x, \forall t \in [0, T]\}$ как вероятность является функцией непрерывной и ограниченной $P(\mathbf{x}_{\text{ном}}, T) \in [0, 1]$. То же самое можно сказать и о критерии вида (3).

Задачу ОПС в виде (1) можно рассматривать как задачу математического программирования с ограничениями [5]. Ее особенностями являются многомерность, стохастичность, нелинейность и в общем случае невыпуклость.

Часто задача параметрического синтеза состоит не в поиске номиналов параметров, при которых достигается максимум вероятности безотказной работы, а в обеспечении ВБР не ниже требуемой:

$$P(\mathbf{x}_{\text{ном}}, T) \geq P_{\text{тр}}.$$

В этом случае, прежде всего, возникает вопрос о достижимости необходимого уровня ВБР при выбранной структуре объекта проектирования. Расчет предельных возможностей целесообразно производить, если при этом трудоемкость вычислительного процесса будет существенно меньше трудоемкости решения задачи (1).

Необходимо заметить, что требуемый уровень ВБР обычно достаточно высок (по крайней мере, существенно больше 0,5), а также тот факт, что

$$P(\mathbf{x}_{\text{ном}}, T) \leq P_0, \quad (4)$$

где $P_0 = P(\mathbf{x}_{\text{ном}}, 0)$ – вероятность выполнения условий работоспособности в момент времени $t = 0$, которую называют обычно серийнопригодностью или выходом годных.

Соотношение (4) следует из того факта, что случайное событие, состоящее в выполнении условий работоспособности в течение интервала времени $[0, T]$, является произведением двух событий, первое из которых – нахождение системы в работоспособном состоянии в начальный момент времени $t = 0$, а второе – выполнение условий работоспособности непрерывно в течение времени эксплуатации T . С учетом этого в качестве первого этапа процесса поиска экстремума ВБР целесообразно провести поиск максимума вероятности выполнения условий работоспособности в момент времени $t = 0$, что существенно проще решения задачи (1). Действительно, для расчета серийнопригодности приходится оперировать случайными величинами, а не случайными процессами, и, кроме того, при этом иногда удается заменить исходную задачу со стохастическим критерием оптимальности эквивалентной задачей с детерминированным критерием. Так, например, для выпуклых областей работоспособности и симметричной относительно математического ожидания функции распределения плотности вероятности параметров задача сводится к поиску центра тяжести области работоспособности D_x [6].

Переходить ко второму этапу следует лишь в том случае, если достижимый уровень серийнопригодности будет больше требуемого значения ВБР. В противном случае необходимо вернуться к этапу структурного синтеза. Например, выбрать структуру проектируемого объекта с элементами настройки [7].

Оптимальный параметрический синтез в условиях неопределенности

Часто необходимая априорная информация о вероятностных свойствах отклонений параметров от расчетных значений отсутствует или является недостаточно полной. Это объясняется тем, что ее получение связано с необходимостью проведения длительных и дорогостоящих испытаний большого числа однотипных элементов, а также быстрым старением этой информации. Возникает необходимость решения задачи ОПС в условиях неполноты и недостаточной достоверности исходной информации, т.е. в условиях неопределенности. Рассмотрим наиболее часто встречающиеся при этом ситуации:

– Известен только начальный разброс параметров (закон распределения вектора $\mathbf{X}_0$), который определяется технологическими (производственными) факторами. В этом случае задача (1) имеет вид

$$\mathbf{x}_{\text{ном}} = \arg \max P\{\mathbf{X}_0(\mathbf{x}_{\text{ном}}) \in D_x, t = 0\}. \quad (5)$$

Она является частным случаем общей задачи ОПС и носит название задачи оптимизации выхода годных (серийнопригодности).

- Известны только числовые характеристики (моменты распределения) случайных величин, входящих в модели процессов изменения параметров. Обычно это математические ожидания и дисперсии самих параметров, коэффициентов старения, температурных коэффициентов и др.

- Отклонения параметров и коэффициентов выбранной модели отклонения параметров заданы интервально (в виде пределов возможных вариаций).

- Информация о закономерностях изменений параметров элементов системы, а следовательно, и изменениях выходных параметров полностью отсутствует.

Стратегию поиска оптимальных значений номиналов параметров в условиях неопределенности целесообразно строить в виде набора (веера) методов и алгоритмов решения отдельных задач ОПС, адекватных имеющейся априорной информации о параметрических возмущениях. При этом для каждой отдельной ситуации оптимальным можно считать результат, обеспечивающий гарантированный уровень работоспособности, максимальный при имеющемся объеме исходной информации. Другими словами, оптимальность в условиях неопределенности будем понимать в минимаксном смысле, т.е. с точки зрения получения наилучшего результата при наиболее неблагоприятных (из множества допустимых) параметрических возмущениях.

Следует обратить внимание на еще одну особенность решения задачи ОПС. Чтобы получить какую-то информацию о возможных вариациях параметров проектируемой системы, необходимо знать типонамины элементов этой системы (для электрорадиоэлементов это тип элемента, номинальные значения его параметров, класс точности, номинальная мощность или напряжение). Выбор типонаминов может быть осуществлен на основе интуиции и опыта разработчика, по прототипам или в результате каких-то расчетов. При этом необходимо, чтобы при выбранных номиналах параметров выполнялись условия работоспособности (номинальная точка принадлежала области работоспособности D_x).

Как отмечалось выше, условия работоспособности задаются обычно требованиями технического задания в виде ограничений (2) на выходные параметры. Любая комбинация параметров элементов (внутренних параметров) однозначно определяет некоторую совокупность значений выходных параметров и таким образом точку в пространстве выходных параметров. Совокупность параметров элементов представляет допустимое решение, если соответствующая точка пространства выходных параметров лежит в многомерном полиэдре, задаваемом ограничениями на выходные параметры.

При поиске допустимого решения необходимо учитывать параметры рабочих условий. Желательно установить номинальные значения параметров элементов так, чтобы допустимое решение получалось при любой комбинации параметров рабочих условий (например, температуры). Поэтому можно считать, что каждый параметр рабочих условий принимает либо свое номинальное значение, либо одно из крайних значений. Система же исследуется в своих рабочих состояниях, образованных всеми возможными комбинациями этих пар.

Определенной характеристикой возможности системы выполнять заданные функции в условиях параметрических возмущений является область работоспособности D_x , построенная в координатах параметров схемных элементов системы [8]. Совокупность значений внутренних параметров может быть представлена изображающей точкой в n -мерном пространстве этих параметров. Для обеспечения работоспособности системы эта точка должна находиться внутри области D_x . При этом расстояние от изображающей точки до границ D_x можно рассматривать как некоторый запас работоспособности системы.

Запас работоспособности можно рассматривать на уровне внутренних параметров (параметров элементов) или выходных параметров системы.

Запас работоспособности первого типа – на уровне внутренних параметров – позволяет оценить степень удаленности вектора внутренних параметров от границ области работоспособности, а следовательно, пределы возможных вариаций параметров элементов, при которых не нарушаются условия работоспособности. Задача оптимального параметрического синтеза в этом случае сводится к нахождению такой точки внутри области работоспособности D_x (выбора такого вектора номиналов параметров), которая находится на максимальном в смысле выбранного критерия расстоянии от ее границ [9].

Если область работоспособности D_x неизвестна, то выполнение условий работоспособности при выбранных внутренних параметрах проверяется в результате вычисления соответствующих выходных параметров и сравнения их с требованиями технического задания (областью допустимых значений выходных параметров D_y).

Можно говорить о запасе работоспособности второго типа, представляющем собой меру удаленности вектора выходных параметров $y = (y_1(x), y_2(x), \dots, y_m(x))$ от заданных требованиями технического задания границ области D_y .

Поскольку задача параметрического синтеза состоит в выборе номинальных значений внутренних параметров, будем называть выбор значений параметров по критерию запаса работоспособности первого типа прямой задачей, а выбор по критерию запаса работоспособности второго типа – обратной.

Любая комбинация внутренних параметров $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ однозначно определяет некоторую совокупность выходных величин $y = (y_1(x), y_2(x), \dots, y_m(x))$ и, таким образом, некоторую точку $y \in R^m$ в m -мерном пространстве выходных параметров. При этом обратное отображение не всегда является однозначным: одному и тому же набору значений выходных параметров могут соответствовать несколько различных векторов внутренних параметров.

Технология параллельных вычислений в задачах параметрического синтеза

Стохастический характер критерия оптимальности, многомерность пространства поиска, необходимость решения задачи глобальной оптимизации заставляют искать пути создания эффективных численных методов решения задач ОПС. В целях сокращения вычислительных затрат при решении задач ОПС целесообразно использовать алгоритмы предварительного анализа данных, понижения размерности пространства поиска, ландшафтного анализа целевой функции и др.

Одним из наиболее радикальных путей решения задач высокой вычислительной сложности является распараллеливание процесса поиска решения с использованием вычислительных кластеров, систем на основе графических процессорных устройств, локальных вычислительных сетей и т.д.

Можно предложить несколько вариантов стратегии ОПС с использованием технологии параллельных и распределенных вычислений.

В основе первой из стратегий лежит идея создания параллельных методов расчета целевой функции и методов оптимизации.

Параллельный алгоритм расчета (оценки) ВБР является модификацией метода статистических испытаний (Монте-Карло). С помощью специальной подпрограммы-генератора моделируются реализации случайного процесса изменения параметров исследуемой технической системы. Для каждой из реализаций производится проверка выполнения условий работоспособности в течение заданного времени T . Число моделируемых реализаций определяется необходимой точностью оценки вероятности безотказной работы [10].

Создание и реализация параллельного аналога метода статистических испытаний не вызывают принципиальных затруднений. Использование параллельных вычислений в этом методе является вполне логичным, поскольку идея параллелизма – повторения некоторого типового процесса с различными наборами данных – заложена в самой структуре метода. Интуитивно понятно, что использование k независимых процессоров и распределение между ними независимых испытаний уменьшит трудоемкость статистического моделирования почти в k раз, поскольку затраты на заключительное суммирование и осреднение результатов практически несущественны [10].

Дальнейшее уменьшение времени решения задачи ОПС может быть достигнуто за счет распараллеливания алгоритма поиска экстремума.

Простейшим из прямых методов поиска, обладающих свойством потенциального параллелизма, является метод сканирования.

Сущность метода заключается в том, что область поиска разбивается на элементарные ячейки, в каждой из которых по определенному алгоритму выбирается точка: в центре ячейки, на ребрах или вершинах. В каждой ячейке осуществляется последовательный просмотр значений целевой функции и нахождение среди них экстремального значения. Точность метода, естественно, определяется тем, насколько плотно располагаются выбранные точки в области поиска.

Основным достоинством метода сканирования является то, что при его использовании с достаточно густым расположением точек всегда гарантируется отыскание глобального экстремума. Однако для этого в данном методе требуется значительный объем вычислений, снизить который можно путем распараллеливания алгоритма [11].

В задачах ОПС выборочное множество номиналов в большинстве случаев является само по себе дискретным. Это связано с тем, что номиналы параметров большинства типовых электро-

радиоэлементов (резисторов, конденсаторов, катушек индуктивности, операционных усилителей и др.) регламентированы техническими условиями или стандартами. Для активных элементов разработчик на основе опыта и интуиции обычно может задать возможные варианты используемых элементов, а следовательно, и номинальные значения их параметров. В тех же довольно редких случаях, когда имеется возможность выбирать номинальные значения параметров из непрерывного диапазона, можно использовать процедуру дискретизации. Таким образом, в большинстве случаев можно считать, что выборочное множество номиналов при решении задач ОПС является дискретным.

В простейшем случае поиск решения сводится к полному перебору элементов множества возможных значений номиналов внутренних параметров D_n^{bh} , в каждой точке x_n^{bh} которого необходимо найти значение целевой функции.

Учитывая цикличность процедуры вычисления целевой функции, несложно применить параллелизм по данным.

Пусть процесс решения можно осуществить с использованием k процессоров. Множество D_n^{bh} разбивается на непересекающиеся подмножества $D_n^{bh} = \bigcup_{i=1}^k \{D_{n,i}^{bh}\}$, при этом каждому j -му процессору назначается свое подмножество $D_{n,j}^{bh}$ исходных данных. Таким образом, каждый j -й процессор осуществляет расчет целевой функции для всех элементов множества $D_{n,j}^{bh}$ и находит оптимальный вектор номиналов параметров для своей подобласти. Результаты передаются главному процессору, который производит выбор оптимального вектора номиналов по всей области D_n^{bh} . Такое разбиение всего множества поиска на непересекающиеся подмножества составляет суть блока диспетчеризации параллельного распределенного процесса.

Для симметричного вычислительного кластера, состоящего из k равных по мощности вычислительных узлов, общее число точек разбивается на равные количества для каждого из подчиненных процессов. В случае несимметричного кластера необходимо провести предварительную процедуру оценки трудоемкости типовой процедуры метода оптимизации, в качестве которой выступает однократное моделирование работы системы, проверка условий работоспособности и вычисление значений критерия оптимальности. При этом вычислительная нагрузка делится между компонентами комплекса пропорционально их производительности.

По окончании работы программы диспетчеризации вычислительного процесса каждому вычислительному компоненту комплекса рассылаются границы его подмножества $D_{n,j}^{bh}$ исходных данных. По окончании счета главный процессор получает результаты от подчиненных и проводит формирование окончательных результатов дискретной оптимизации на всем множестве D_n^{bh} .

Другая возможная стратегия ОПС основана на построении и использовании области допустимых значений внутренних параметров (области работоспособности) D_x .

Привлекательность этой стратегии в определенной мере связана с возможностью декомпозиции общей задачи ОПС на две подзадачи.

Первая из них состоит в построении, анализе и аппроксимации области D_x . Это задача высокой вычислительной трудоемкости, поскольку ее решение связано с необходимостью многократного вычисления значений выходных параметров системы.

Вторая подзадача включает вычисление целевой функции и нахождение оптимальных значений номиналов параметров. Получение решений в этом случае не связано с необходимостью обращения к модели исследуемой системы, что значительно уменьшает трудоемкость параметрического синтеза.

Таким образом, стратегия ОПС в этом случае будет состоять из двух этапов, первый из которых связан с построением области допустимых вариаций параметров D_x . Для ее решения разработан ориентированный на использование технологии параллельных (распределенных) вычислений программно-алгоритмический комплекс СНИОР [12].

На втором этапе осуществляется поиск оптимальных решений. При известной области работоспособности трудоемкость вычисления значений целевой функции и поиска экстремума существенно уменьшается. Теперь при проведении статистических испытаний нет необходимости вычислять значения выходных параметров проектируемого объекта (обращаться к модулю детерминированного анализа).

Кроме того, существенное сокращение вычислительных затрат может быть достигнуто путем использования области D_x для параллельных аналогов методов поисковой оптимизации. Таким образом, при использовании стратегии ОПС, основанной на построении областей работоспособности, решение поставленной задачи осуществляется в два этапа, первый из которых можно считать подготовительным (построение области D_x), а второй – основным.

Заметим, что метод сканирования требует не всегда оправданно высоких вычислительных затрат. К числу методов, обладающих свойством потенциального параллелизма и зачастую более эффективных, можно отнести методы случайного поиска и эвристические методы роевого интеллекта [13].

Заключение

В данной статье рассмотрены некоторые методологические проблемы принятия проектных решений, возникающие в процессе оптимального параметрического синтеза аналоговых технических устройств и систем с учетом стохастических закономерностей изменения их параметров и требований надежности.

Показано, что начинать решение задачи параметрического синтеза сразу в общем виде (1) не целесообразно, даже если имеется вся необходимая для этого информация. Прежде всего, необходимо убедиться, что множество значений внутренних параметров D_x , при которых выполняются условия работоспособности (2), заданные техническим заданием, не пусто.

Может оказаться, что область работоспособности D_x очень мала вследствие неудачно выбранной структуры системы. В этой связи было бы полезно оценить размеры области D_x , а точнее определить пределы возможных вариаций параметров, при которых сохраняется работоспособность системы.

Возникает задача оценки запаса работоспособности по каждому из внутренних параметров и выбора таких значений номиналов параметров, при которых обеспечивается максимальный запас работоспособности по «наихудшему» из внутренних параметров.

На следующем этапе целесообразно оценить предельные возможности выбранной структуры системы с точки зрения выполнения условий работоспособности при учете закономерностей стохастических вариаций параметров. Если вероятность выполнения условий работоспособности в начальный момент времени оказывается достаточно высокой (приемлемой), можно приступить к решению наиболее трудоемкой задачи оптимального параметрического синтеза вида (1). Такая последовательность решения различных модификаций задач ОПС по принципу «от простого к сложному» является, на наш взгляд, наиболее продуктивной и оправданной.

Результаты получены с использованием оборудования ЦКП «Дальневосточный вычислительный ресурс» ИАПУ ДВО РАН (<https://cc.dvo.ru>).

Список литературы

1. Макаров И. М., Ахрем А. А., Рахманкулов В. З. Виртуальное проектирование и принятие проектных решений // Академик И. М. Макаров и его научная школа. М. : Наука, 2007. С. 240–258.
2. Норенков И. П. Основы автоматизированного проектирования. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Е. Баумана, 2002. 336 с.
3. Абрамов О. В. Методы и алгоритмы параметрического синтеза стохастических систем // Проблемы управления. 2006. № 4. С. 3–8.
4. Abramov O., Dimitrov B. Reliability Design in Gradual Failures: A Functional-Parametric Approach // Reliability: Theory & Applications. 2017. Vol. 12, no. 4. P. 39–48.
5. Абрамов О. В. Параметрическая надежность: расчет и оптимизация // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2008. Т. I. С. 23–26.
6. Васильев Б. В., Козлов Б. А., Ткаченко Л. Г. Надежность и эффективность радиоэлектронных устройств. М. : Советское радио, 1964.
7. Абрамов О. В. Проектирование технических систем с элементами настройки // Надежность и качество сложных систем. 2014. № 2. С. 51–55.
8. Abramov O., Nazarov D. Regions of Acceptability Approximation in Reliability Design // Reliability: Theory & Applications. 2012. Vol. 7, no. 3. P. 43–49.
9. Абрамов О. В. Алгоритм оценки и прогнозирования остаточного ресурса сложных технических систем // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2013. Т. I. С. 5–6.

10. Абрамов О. В. Эффективный метод статистического моделирования в задачах оптимального параметрического синтеза // Информатика и системы управления. 2008. № 1. С. 12–16.
11. Абрамов О. В., Катуева Я. В. Параллельные алгоритмы анализа и оптимизации параметрической надежности // Надежность. 2005. № 4. С. 19–26.
12. Абрамов О. В., Назаров Д. А. Программно-алгоритмический комплекс построения, анализа и использования областей работоспособности // Информационные технологии и вычислительные системы. 2015. № 2. С. 3–13.
13. Абрамов О. В., Лагунова А. Д. Об использовании эвристических алгоритмов в задачах оптимального параметрического синтеза // Информатика и системы управления. 2021. № 2. С. 34–46.

References

1. Makarov I.M., Akhrem A.A., Rakhmankulov V.Z. Virtual design and project decision-making. *Akademik I.M. Makarov i ego nauchnaya shkola = Academician I. M. Makarov and his scientific school*. Moscow: Nauka, 2007:240–258. (In Russ.)
2. Norenkov I.P. *Osnovy avtomatizirovannogo proektirovaniya = Fundamentals of computer-aided design*. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2002:336. (In Russ.)
3. Abramov O.V. Methods and algorithms of parametric synthesis of stochastic systems. *Problemy upravleniya = Management problems*. 2006;(4):3–8. (In Russ.)
4. Abramov O., Dimitrov B. Reliability Design in Gradual Failures: A Functional-Parametric Approach. *Reliability: Theory & Applications*. 2017;12(4):39–48.
5. Abramov O.V. Parametric reliability: calculation and optimization. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2008;I:23–26. (In Russ.)
6. Vasil'ev B.V., Kozlov B.A., Tkachenko L.G. *Nadezhnost' i effektivnost' radioelektronnykh ustroystv = Reliability and efficiency of radio-electronic devices*. Moscow: Sovetskoe radio, 1964. (In Russ.)
7. Abramov O.V. Design of technical systems with configuration elements. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2014;(2):51–55. (In Russ.)
8. Abramov O., Nazarov D. Regions of Acceptability Approximation in Reliability Design. *Reliability: Theory & Applications*. 2012;7(3):43–49.
9. Abramov O.V. Algorithm for estimating and predicting the remaining resource of complex technical systems. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2013;I:5–6. (In Russ.)
10. Abramov O.V. An effective method of statistical modeling in optimal parametric synthesis problems. *Informatika i sistemy upravleniya = Computer Science and control systems*. 2008;(1):12–16. (In Russ.)
11. Abramov O.V., Katueva Ya.V. Parallel algorithms for analysis and optimization of parametric reliability. *Nadezhnost' = Reliability*. 2005;(4):19–26. (In Russ.)
12. Abramov O.V., Nazarov D.A. Software and algorithmic complex for the construction, analysis and use of performance areas. *Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy = Information technologies and computer systems*. 2015;(2):3–13. (In Russ.)
13. Abramov O.V., Lagunova A.D. On the use of heuristic algorithms in optimal parametric synthesis problems. *Informatika i sistemy upravleniya = Computer science and control systems*. 2021;(2):34–46. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Олег Васильевич Абрамов

доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ,
заведующий лабораторией управления
надежностью сложных систем,
Институт автоматизации и процессов управления
Дальневосточного отделения
Российской академии наук
(Россия, г. Владивосток, ул. Радио, 5)
E-mail: abramov@iacp.dvo.ru

Oleg V. Abramov

Doctor of technical sciences, professor,
honored scientist of the Russian Federation,
head of the laboratory reliability of complex systems,
Institute for Automation and Control processes,
Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences
(5 Radio street, Vladivostok, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 11.03.2021

Поступила после рецензирования/Revised 30.03.2021

Принята к публикации/Accepted 31.03.2021

К ПРОБЛЕМЕ СИНТЕЗА УПРАВЛЯЕМЫХ МОДЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ОГРАНИЧЕНИЯХ НА СТРАТЕГИИ УПРАВЛЕНИЯ

В. А. Каштанов¹, О. Б. Зайцева²

¹ Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия
² Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия
¹ vakashtanov@hse.ru, ² o_zaitseva@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Исследуются управляемые модели надежности и безопасности при ограничении на стратегии управления. *Материалы и методы.* Математическая задача сводится к поиску экстремума дробно-линейного функционала, характеризующего качество функционирования системы и качество управления, по множеству функций распределения, определяющих периодичность проведения плановых восстановительных работ. *Результаты и выводы.* Особенности постановки задачи заключаются в том, что вводятся ограничения на распределения, выражаемые ограничениями на линейные функционалы, но число таких ограничений несчетно. При решении задачи основное внимание уделено анализу структуры функции распределения, на которой достигается искомый экстремум.

Ключевые слова: управляемый полумарковский процесс, стратегия управления, дробно-линейный функционал, задача оптимизации

Для цитирования: Каштанов В. А., Зайцева О. Б. К проблеме синтеза управляемых моделей надежности и безопасности при ограничениях на стратегии управления // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 2. С. 13–23. doi:10.21685/2307-4205-2021-2-2

ON THE PROBLEM OF SYNTHESIS OF CONTROLLED RELIABILITY MODELS AND SECURITY UNDER RESTRICTIONS ON MANAGEMENT STRATEGIES

V.A. Kashtanov¹, O.B. Zaytseva²

¹ National Research University "Higher School of Economics", Moscow, Russia
² Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia
¹ vakashtanov@hse.ru, ² o_zaitseva@mail.ru

Abstract. *Background.* The paper investigates controlled models of reliability and safety under constraints on control strategies. *Materials and methods.* The mathematical problem is reduced to the search for the extremum of the linear-fractional functional characterizing the quality of the system's functioning and the quality of control over the set of distribution functions that determine the frequency of planned restoration work. *Results and conclusions.* The peculiarities of the problem statement are that there are restrictions on distributions expressed by restrictions on linear functionals, but the number of such restrictions is uncountable. When solving the problem, the main attention is paid to the analysis of the structure of the distribution function at which the desired extremum is reached.

Keywords: controlled semi-Markov process, control strategy, linear-fractional functional, optimization problem

For citation: Kashtanov V.A., Zaytseva O.B. On the problem of synthesis of controlled reliability models and security under restrictions on management strategies. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2021;2:13–23. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2021-2-2

Введение

При исследовании управляемых моделей надежности и безопасности строится управляемый случайный процесс, описывающий эволюцию исследуемой системы, затем на траекториях этого процесса определяется некоторый функционал, который определяет качество функционирования и

управления, и, наконец, решается задача оптимизации этого функционала, т.е. определение экстремума функционала и характеристик, определяющих стратегию управления, на которых этот экстремум достигается.

Для моделей надежности и безопасности, когда речь идет об оптимальном выборе периодичности проведения плановых предупредительных работ, пространство управлений совпадает с множеством положительных чисел $R^+ = (0, \infty)$, а вероятностная мера задается функциями распределения $G(u) = P\{\chi < u\}$, где χ есть принимаемое решение.

Если процесс функционирования исследуемой системы описывается управляемым полумарковским процессом с конечным множеством состояний [1, 2], то математическое ожидание накопленного эффекта (функционала) при длительном наблюдении за процессом функционирования исследуемой системы является дробно-линейным функционалом

$$I(G_1, G_2, \dots, G_N) = \frac{\int_0^{+\infty} \int_0^{+\infty} \dots \int_0^{+\infty} A(t_1, t_2, \dots, t_N) dG_1(t_1) dG_2(t_2) \dots dG_N(t_N)}{\int_0^{+\infty} \int_0^{+\infty} \dots \int_0^{+\infty} B(t_1, t_2, \dots, t_N) dG_1(t_1) dG_2(t_2) \dots dG_N(t_N)}, \quad (1)$$

если вложенная цепь Маркова имеет N состояний и в состоянии i решение (период проведения плановых предупредительных работ) определяется функцией распределения $G_i(t)$.

Данная зависимость позволила поставить математическую задачу поиска экстремума (максимума или минимума) этого дробно-линейного функционала по множеству допустимых стратегий управления (распределений) и определение стратегии (оптимальный набор распределений), на которой этот экстремум достигается.

При такой постановке возникает вопрос, как определить пространство допустимых стратегий управления. Коль скоро стратегии в моделях надежности и безопасности отождествляются (определяются) с распределениями положительных случайных величин $G_i(t)$, то ограничения формулируются для этих распределений. Стандартно ограничения сводятся к двум условиям:

1) поиск экстремума функционала (1) осуществляется по множеству допустимых стратегий управления, которые как вероятностные распределения удовлетворяют неравенствам

$$0 \leq G_i(t) \leq 1, i \in E = (1, 2, \dots, N), t \geq 0, \quad (2)$$

где $E = (1, 2, \dots, N)$ – множество состояний вложенной цепи Маркова. Неравенства (2) определяют ограничения на множество допустимых стратегий управления $\Omega = \{\bar{G} = (G_1, G_2, \dots, G_N)\}$;

2) множеству допустимых стратегий управления Ω принадлежат только те распределения $\bar{G} = (G_1, G_2, \dots, G_N)$, для которых существуют интегралы, входящие в выражение (1).

В настоящей работе мы обобщим пространство возможных стратегий и усилим ограничения (2).

В реальной ситуации не всегда можно часто проводить плановые восстановительные работы. Поэтому на пространство допустимых стратегий введем дополнительные ограничения.

Введем в рассмотрение набор функций распределения

$$0 \leq G_{1i}(t) \leq G_{2i}(t) \leq 1, i \in E, t \geq 0, G_{1i}(t) = G_{2i}(t) = 0, t \leq 0$$

и зададим набор положительных констант $(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_N)$.

Далее определим множество допустимых распределений для каждого состояния и множество допустимых стратегий

$$\Omega_i = \left\{ G_i(t) : 0 \leq G_{1i}(t) \leq G_{2i}(t) \leq 1, \int_0^{\infty} x dG_i(x) \geq \mu_i \right\}, i \in E; \quad (3)$$

$$\Omega = \prod_{i \in E} \Omega_i. \quad (4)$$

Далее заметим, что для каждого состояния ограничения (3) помимо классического ограничения на первый момент, выраженного неравенством $\int_0^{\infty} x dG_i(x) \geq \mu_i$ на линейный функционал, содержатся неравенства, относящиеся непосредственно к распределениям. Однако следует заметить, что последние также можно представить в виде ограничений типа неравенств на линейные функционалы

$$G_{1i}(t) \leq \int_0^{+\infty} u(x,t) dG_i(x) \leq G_{2i}(t), i \in E = (1, 2, \dots, N), u(x,t) = \begin{cases} 1, x < t, \\ 0, x \geq t; \end{cases} t \in [0, +\infty).$$

Следовательно, сформулированная задача есть задача дробно-линейного программирования при несчетном числе линейных ограничений.

Теперь в принятых обозначениях можно сформулировать математическую задачу: *определить максимум дробно-линейного функционала (1) по множеству допустимых распределений (4) и стратегию $\bar{G}^{(0)} = (G_1^{(0)}, G_2^{(0)}, \dots, G_N^{(0)})$, на которой этот максимум достигается:*

$$\max_{G \in \Omega} I(G_1, G_2, \dots, G_N) = I(G_1^{(0)}, G_2^{(0)}, \dots, G_N^{(0)}). \quad (5)$$

Основные математические результаты

1. Анализ ограничений. Прежде всего проведем анализ ограничений на множество допустимых распределений (стратегий управления), определяемых соотношениями (2) и (3) для того, чтобы определить исходные данные, при которых множество Ω не пусто, $\Omega \neq \emptyset$.

Для положительной случайной величины ξ с распределением $G(x)$ справедливо равенство для математического ожидания $M\xi$

$$\int_0^{+\infty} x dG(x) = \int_0^{+\infty} \bar{G}(x) dx, \quad \bar{G}(x) = 1 - G(x),$$

если существует какой-либо из интегралов, входящих в это равенство.

Следовательно, исходные данные (константы μ_i и функции $G_{1i}(t), G_{2i}(t), i \in E$) должны быть такими, чтобы для них выполнялись неравенства

$$\mu_{2i} = \int_0^{+\infty} \bar{G}_{2i}(x) dx \leq \mu_i \leq \int_0^{+\infty} \bar{G}_{1i}(x) dx = \mu_{1i}, \quad \bar{G}_{ki}(x) = 1 - G_{ki}(x), i \in E, k = 1, 2.$$

Если для некоторого состояния $i \in E$ выполняется неравенство $\mu_i > \mu_{1i}$, то множество допустимых стратегий Ω пусто, $\Omega = \emptyset$. Если для некоторого состояния $i \in E$ выполняется неравенство $\mu_i < \mu_{2i}$, то дополнительное условие на первый момент является несущественным.

2. Упрощение задачи. В настоящем разделе сформулируем лемму, позволяющую свести решение задачи дробно-линейного программирования к задаче линейного программирования. Она формулирует достаточные условия совпадения множеств распределений, на которых достигаются экстремумы дробно-линейного функционала и специально подобранного линейного функционала.

ЛЕММА [3]. Если существует максимум дробно-линейного функционала (1) по множеству распределений $\bar{G} = (G_1, G_2, \dots, G_N) \in \Omega$ (обозначим его через C), тогда выполняется равенство для множеств распределений, на которых достигаются экстремумы двух функционалов дробно-линейного и специально подобранного линейного, а именно:

$$\Omega_0 = \{ \bar{G} : I(\bar{G}) = C \} = \{ \bar{G} : \max_{\bar{G} \in \Omega} J(\bar{G}) = 0 \}, \quad (6)$$

где линейный специально подобранный функционал и его подынтегральная функция определяются равенствами

$$J(\bar{G}) = \int_0^{+\infty} \int_0^{+\infty} \dots \int_0^{+\infty} C(t_1, t_2, \dots, t_N) dG_1(t_1) dG_2(t_2) \dots dG_N(t_N),$$

$$C(t_1, t_2, \dots, t_N) = A(t_1, t_2, \dots, t_N) - CB(t_1, t_2, \dots, t_N). \quad (7)$$

Таким образом, при исследовании структуры экстремального распределения дробно-линейного функционала необходимо анализировать свойства функции (7), в определение которой входит неизвестный параметр C .

З а м е ч а н и е. В работе [4] приведено доказательство леммы (равенство (6)) при дополнительном ограничении – положительности подынтегральной функции знаменателя (1),

$$B(t_1, t_2, \dots, t_N) > 0, t_i > 0, i \in E.$$

3. Анализ структуры экстремальной функции для линейного функционала. Анализ начнем с исследования линейного функционала, определяемого равенством (число состояний $N = 1$)

$$L(G) = \int_0^{+\infty} C(t) dG(t), \quad (8)$$

где $C(t)$ – ограниченная на любом конечном отрезке функция, имеющая конечное число точек разрыва первого рода и определенная на полупрямой, $t \in [0, +\infty)$; $G(t)$ функция распределения действительной случайной величины. Считаем далее функции распределения непрерывными слева.

Обозначим:

- $\Omega^{(1)}$ множество функций распределения $G(t)$, для которых функционал (8) существует;
- $\Omega^{(2)}$ множество функций распределения $G(t)$, для которых выполняются неравенства при $t > 0$

$$0 \leq G_{11}(t) \leq G(t) \leq G_{21}(t) \leq 1, \quad (9)$$

где $G_{i1}(t), i=1,2$, $G_{11}(t) \leq G_{21}(t)$ – две заданные функции распределения, принадлежащие множеству $\Omega^{(1)}$;

- $\Omega^{(3)}$ множество функций распределения $G(t)$, для которых выполняется неравенство

$$\int_0^{+\infty} t dG(t) \geq \mu_1; \quad (10)$$

– $\Omega = \Omega^{(1)} \cap \Omega^{(2)} \cap \Omega^{(3)}$ – множество функций распределения $G(t)$, для которых функционал (8) существует и для которых выполняются неравенства (9) и (10).

Предположим, что для функционала (8) на множестве Ω существует экстремум, например, существует максимум

$$\max_{G \in \Omega} L(G) = C < \infty.$$

Обозначим $\Omega^{(0)}$ множеством распределений, для которых достигается максимум функционала (8), причем справедливо соотношение

$$\Omega^{(0)} \neq \emptyset$$

в силу условия существования максимума.

Сначала решаем задачу без ограничения $G \in \Omega^{(3)}$.

Теперь сформулируем теорему.

ТЕОРЕМА 1 [5]. Если существует максимум функционала (8) по множеству распределений $\Omega_1 = \Omega^{(1)} \cap \Omega^{(2)}$, $\max_{G \in \Omega} L(G) = C < \infty$, подынтегральная функция $C(t)$ имеет ровно один максимум в точке $0 \leq t_1 \leq +\infty$ и в области $0 < t < t_1$ подынтегральная функция неубывающая, а в области $t_1 < t < +\infty$ подынтегральная функция невозрастающая, то этот максимум функционала достигается на распределении

$$G^*(t) = \begin{cases} G_{11}(t), & 0 \leq t \leq t_1, \\ G_{21}(t), & t_1 < t \leq +\infty, \end{cases} \quad (11)$$

т.е.

$$\begin{aligned} \max_{G \in \Omega_1} L(G) &= L(G^*) = C = \\ &= \int_0^{t_1} C(x) dG_{11}(x) + C(t_1) \left[\lim_{x \rightarrow t_1+0} G_{21}(x) - G_{11}(t_1) \right] + \int_{t_1+0}^{+\infty} C(x) dG_{21}(x) \end{aligned} \quad (12)$$

и справедливо равенство

$$\max_{t \in [0, +\infty)} \left\{ \int_0^t C(x) dG_{11}(x) + C(t) \left[\lim_{x \rightarrow t+0} G_{21}(x) - G_{11}(t) \right] + \int_{t+0}^{+\infty} C(x) dG_{21}(x) \right\} = C. \quad (13)$$

Напомним, что доказательство вышеприведенного утверждения изложено в работе [5]. Кроме этого, отмечаем, пока проблема исследуется без учета ограничений на первый момент.

Далее сформулируем полезное следствие доказанной теоремы.

СЛЕДСТВИЕ. Если подынтегральная функция $C(t)$ в области определения $0 \leq t \leq +\infty$ не убывает ($t_1 = +\infty$), то максимум функционала (8) достигается на нижней границе $L(G_{11}) = C$. Если подынтегральная функция $C(t)$ в области определения $0 \leq t \leq +\infty$ не возрастает ($t_1 = 0$), то максимум функционала (8) достигается на верхней границе, т.е. $C = L(G_{21})$.

Далее принимаем во внимание условие $G \in \Omega^{(3)}$. Сначала вычисляем первый момент для экстремальной функции (11) при оптимизации по множеству распределений $\Omega_1 = \Omega^{(1)} \cap \Omega^{(2)}$. С учетом замечаний, изложенных в разделе «Анализ ограничений», и конкретного вида экстремальной функции (11) имеем

$$\mu = \int_0^{+\infty} t dG^*(t) = \int_0^{t_1} (1 - G_{11}(x)) dx + \int_{t_1+0}^{+\infty} (1 - G_{21}(x)) dx,$$

где точка t_1 определяется как точка максимума функции (13).

Тогда, если выполняется неравенство $\mu \geq \mu_1$, то задача решена, оптимальная функция при сформулированных выше условиях определяется равенством (11), если выполняется неравенство $\mu < \mu_1$, то для решения требуются дополнительные исследования.

4. Анализ структуры экстремальной функции для дробно-линейного функционала

При исследовании экстремума (максимума) дробно-линейного функционала

$$I(G) = \frac{\int_0^{+\infty} A(t) dG(t)}{\int_0^{+\infty} B(t) dG(t)} \quad (14)$$

и структуры распределения, на котором этот максимум достигается, воспользуемся теоремой, доказательство которой базируется на сформулированных выше лемме и теореме.

Кроме этого, используем обозначения:

- $\Omega^{(1)}$ – множество функций распределения $G(t)$, для которых функционал (14) существует;
- $\Omega^{(2)}$ – множество функций распределения $G(t)$, для которых выполняются неравенства (9);
- $\Omega^{(3)}$ – множество функций распределения $G(t)$, для которых выполняется неравенство (10);
- $\Omega = \Omega^{(1)} \cap \Omega^{(2)} \cap \Omega^{(3)}$ – множество функций распределения $G(t)$, для которых функционал

(14) существует и для которых выполняются неравенства (9) и (10).

ТЕОРЕМА 2 [5]. Если существует максимум функционала (14) по множеству распределений $\Omega_1 = \Omega^{(1)} \cap \Omega^{(2)}$, а подынтегральные функции $A(t)$ и $B(t)$, ограниченные на любом конечном отрезке, и имеющие конечное число точек разрыва первого рода, а также определенные на полупрямой, $t \in [0, +\infty)$; а также эти функции таковы, что функция $C(t) = A(t) - CB(t)$ имеет ровно один максимум в точке $0 \leq t_1 \leq +\infty$ и в области $0 < t < t_1$ функция $C(t)$ неубывающая, а в области $t_1 < t < +\infty$

функция $C(t)$ невозрастающая, то этот максимум функционала по множеству Ω_1 достигается на распределении (11), т.е.

$$\begin{aligned} \max_{G \in \Omega_1} I(G) = L(G^*) = C = \\ = \frac{\int_0^{t_1} A(x) dG_{11}(x) + A(t_1) \left[\lim_{x \rightarrow t_1+0} G_{21}(x) - G_{11}(t_1) \right] + \int_{t_1+0}^{+\infty} A(x) dG_{21}(x)}{\int_0^{t_1} B(x) dG_{11}(x) + B(t_1) \left[\lim_{x \rightarrow t_1+0} G_{21}(x) - G_{11}(t_1) \right] + \int_{t_1+0}^{+\infty} B(x) dG_{21}(x)} \end{aligned} \quad (15)$$

и справедливо равенство

$$\max_{t \in [0, +\infty)} \frac{\int_0^t A(x) dG_{11}(x) + A(t) \left[\lim_{x \rightarrow t+0} G_{21}(x) - G_{11}(t) \right] + \int_{t+0}^{+\infty} A(x) dG_{21}(x)}{\int_0^t B(x) dG_{11}(x) + B(t) \left[\lim_{x \rightarrow t+0} G_{21}(x) - G_{11}(t) \right] + \int_{t+0}^{+\infty} B(x) dG_{21}(x)} = C. \quad (16)$$

Трудности использования теоремы 2 при исследовании конкретных моделей вызваны тем, что исследователю не известно значение максимума C . Поэтому привлекаются дополнительные условия.

Далее, как и при исследовании линейного функционала, принимаем во внимание условие $G \in \Omega^{(3)}$. Сначала вычисляем первый момент для экстремальной функции (11) при оптимизации по множеству распределений $\Omega_1 = \Omega^{(1)} \cap \Omega^{(2)}$. С учетом замечаний, изложенных в разделе «Анализ ограничений», и конкретного вида экстремальной функции (11) имеем

$$\mu = \int_0^{+\infty} t dG^*(t) = \int_0^{t_1} (1 - G_{11}(x)) dx + \int_{t_1+0}^{+\infty} (1 - G_{21}(x)) dx,$$

где точка t_1 определяется как точка максимума функции (16).

Тогда, если выполняется неравенство $\mu \geq \mu_1$, то задача решена, оптимальная функция при сформулированных выше условиях определяется равенством (11), если выполняется неравенство $\mu < \mu_1$, то для решения требуются дополнительные исследования.

Примеры. Анализ управляемых прикладных моделей

Излагаемые ниже управляемые модели надежности и безопасности в «классической» постановке, когда ограничения формулируются в виде неравенств (2), хорошо известны. Поэтому мы не будем приводить здесь подробные выводы основных соотношений, а отошлем читателя к первоисточникам.

Далее будем использовать обозначения:

- время безотказной работы системы ξ распределено по закону $F(t) = P\{\xi < t\}$, $\bar{F}(t) = 1 - F(t)$;
- плановое предупредительное обновление системы, назначаемое через время $\eta \geq 0$, распределено по закону $G(t) = P\{\eta < t\}$, $G(0) = 0$;
- длительность планового предупредительного (профилактического) обновления γ_1 имеет распределение $F_1(t) = P\{\gamma_1 < t\}$, $\bar{F}_1(t) = 1 - F_1(t)$;
- длительность планового аварийного обновления системы γ_2 распределено по закону $F_2(t) = P\{\gamma_2 < t\}$, $\bar{F}_2(t) = 1 - F_2(t)$;
- длительность внепланового аварийного обновления γ_3 распределено по закону $F_3(t) = P\{\gamma_3 < t\}$, $\bar{F}_3(t) = 1 - F_3(t)$;
- расходы за единицу времени проведения планового предупредительного обновления системы c_1 ;

- расходы за единицу времени проведения планового аварийного обновления системы c_2 ;
 - расходы за единицу времени проведения внепланового аварийного обновления системы c_3 ;
 - расходы за единицу времени, проведенного в состоянии скрытого отказа c_4 ;
 - доход, получаемый за единицу времени исправного функционирования системы c_0 , $c_0 > 0$.
- Для введенных выше параметров справедливы соотношения

$$M\gamma_1 \leq M\gamma_2 \leq M\gamma_3, c_3 \leq c_2 \leq c_1 \leq 0, c_4 < 0.$$

1. Управляемые модели надежности

Модель технического обслуживания системы как единого целого, у которой появившийся отказ проявляется мгновенно.

В начальный момент $t_0 = 0$ начинается эксплуатация системы и назначается плановое предупредительное обновление системы через время $\eta \geq 0$. Назначение плановых предупредительных обновлений системы через случайное время означает введение рандомизации в процесс принятия решений, т.е. в тот момент, когда нужно принимать решение, строится реализация τ случайной величины η ($\eta = \tau$), распределенной по закону $G(t)$, и плановое предупредительное обновление системы проводится через время τ . Если к назначенному моменту τ система не отказала, то в момент τ начинается плановое предупредительное обновление системы, которое по предположению полностью обновляет систему. Если до назначенного момента τ система отказала, то отказ обнаружился мгновенно и в момент отказа ξ начинается внеплановое аварийное обновление системы. После проведения возможных восстановительных работ, когда по предположению система полностью обновляется, осуществляется перепланирование момента проведения следующей предупредительной восстановительной работы и весь процесс обслуживания повторяется заново.

Математическое ожидание удельного дохода за единицу календарного времени определяется равенством, приведенным в работе [6]:

$$I(G) = \frac{\int_0^{+\infty} \left[c_0 \int_0^t \bar{F}(x) dx + c_1 M\gamma_1 \bar{F}(t) + c_3 M\gamma_3 F(t) \right] dG(t)}{\int_0^{+\infty} \left[\int_0^t \bar{F}(x) dx + \bar{F}(t) M\gamma_1 + F(t) M\gamma_3 \right] dG(t)}. \quad (17)$$

Если заданы две функции распределения

$$G_1(t), G_2(t), G_1(t) \leq G_2(t), G_i(0) = 0, i = 1, 2 \quad (18)$$

и требуется найти максимум функционала (16) по множеству распределений

$$\Omega = \{0 \leq G_1(t) \leq G(t) \leq G_2(t) \leq 1\},$$

то по условиям теоремы и леммы необходимо исследовать функцию

$$C(t) = c_0 \int_0^t \bar{F}(x) dx + c_1 M\gamma_1 \bar{F}(t) + c_3 M\gamma_3 F(t) - C \left[\int_0^t \bar{F}(x) dx + \bar{F}(t) M\gamma_1 + F(t) M\gamma_3 \right],$$

где $\max_{G \in \Omega} I(G) = C$.

Дальнейшие исследования проведем при естественном предположении, что исследуемая система стареющая и ее интенсивность отказов $\lambda(t) = \frac{1}{\bar{F}(t)} \frac{dF(t)}{dt}$ – неубывающая функция. Анализируем свойства производной

$$\frac{dC(t)}{dt} = \bar{F}(t) \{ (c_0 - C) + [(c_3 M\gamma_3 - c_1 M\gamma_1) - C(M\gamma_3 - M\gamma_1)] \lambda(t) \}.$$

Если выполняется неравенство $(c_3 M \gamma_3 - c_1 M \gamma_1) - C(M \gamma_3 - M \gamma_1) \geq 0$ или выполняются неравенства

$$\begin{aligned} (c_3 M \gamma_3 - c_1 M \gamma_1) - C(M \gamma_3 - M \gamma_1) &< 0, \\ (c_0 - C) + [(c_3 M \gamma_3 - c_1 M \gamma_1) - C(M \gamma_3 - M \gamma_1)] \lambda(+\infty) &< 0, \end{aligned}$$

то производная положительная $\frac{dC(t)}{dt} > 0$ и функция $C(t)$ достигает единственного максимума при $t = \infty$.

Если выполняются неравенства

$$\begin{aligned} (c_3 M \gamma_3 - c_1 M \gamma_1) - C(M \gamma_3 - M \gamma_1) &< 0, \\ (c_0 - C) + [(c_3 M \gamma_3 - c_1 M \gamma_1) - C(M \gamma_3 - M \gamma_1)] \lambda(0) &< 0, \end{aligned}$$

то $\frac{dC(t)}{dt} < 0$ и функция $C(t)$ достигает единственного максимума при $t = 0$.

Наконец, если выполняются неравенства

$$\begin{aligned} (c_3 M \gamma_3 - c_1 M \gamma_1) - C(M \gamma_3 - M \gamma_1) &< 0, \\ (c_0 - C) + [(c_3 M \gamma_3 - c_1 M \gamma_1) - C(M \gamma_3 - M \gamma_1)] \lambda(0) &> 0, \\ (c_0 - C) + [(c_3 M \gamma_3 - c_1 M \gamma_1) - C(M \gamma_3 - M \gamma_1)] \lambda(+\infty) &< 0, \end{aligned}$$

то производная меняет знак с плюса на минус и в некоторой конечной точке равна нулю, т.е. функция $C(t)$ имеет единственный максимум.

Тем самым доказано, что при любых значениях исходных параметров и любом значении максимума C для функции $C(t)$ выполняются условия доказанной выше теоремы. Поэтому максимум функционала для стареющих систем достигается на функциях (1), а параметр t_1 определяется как точка максимума функции

$$\max_{G \in \Omega_1} I(G) = \max_{\substack{0 \leq \tau \leq +\infty}} \frac{\int_0^\tau A(t) dG_1(t) + A(\tau)(G_2(\tau) - G_1(\tau)) + \int_\tau^{+\infty} A(t) dG_2(t)}{\int_0^\tau B(t) dG_1(t) + B(\tau)(G_2(\tau) - G_1(\tau)) + \int_\tau^{+\infty} B(t) dG_2(t)}, \quad (19)$$

$$\begin{aligned} A(t) &= c_0 \int_0^t \bar{F}(x) dx + c_1 M \gamma_1 \bar{F}(t) + c_3 M \gamma_3 F(t), \\ B(t) &= \int_0^t \bar{F}(x) dx + \bar{F}(t) M \gamma_1 + F(t) M \gamma_3. \end{aligned} \quad (20)$$

Модель технического обслуживания системы как единого целого, у которой появившийся отказ самостоятельно не проявляется.

В начальный момент $t_0 = 0$ начинается эксплуатация системы и назначается плановое предупредительное обновление системы через время $\eta \geq 0$, распределенное по закону $G(t) = P\{\eta < t\}$, $G(0) = 0$. Если к назначенному моменту τ ($\eta = \tau$) система не отказала, то в момент τ начинается плановое предупредительное обновление системы, которое по предположению полностью обновляет систему. Если до назначенного момента τ система отказала, то отказ не обнаруживается до назначенного момента τ , система до момента τ находится в состоянии скрытого отказа и только в момент τ начинается плановое аварийное обновление системы. После проведения возможных восстановительных работ, когда по предположению система полностью обновляется, осуществляется перепланирование момента проведения следующей предупредительной восстановительной работы и весь процесс обслуживания повторяется заново.

Математическое ожидание удельного дохода за единицу календарного времени определяется равенством, приведенном в работах [7] и [8]:

$$I(G) = \frac{\int_0^{+\infty} \left[c_0 \int_0^t \bar{F}(x) dx + c_4 \int_0^t F(x) dx + c_1 M \gamma_1 \bar{F}(t) + c_2 M \gamma_2 F(t) \right] dG(t)}{\int_0^{+\infty} [t + \bar{F}(t) M \gamma_1 + F(t) M \gamma_2] dG(t)}. \quad (21)$$

Зададим две функции распределения (18) и найдем максимум функционала (21) по множеству распределений Ω_1 .

По условиям теоремы и леммы необходимо исследовать функцию

$$C(t) = c_0 \int_0^t \bar{F}(x) dx + c_4 \int_0^t F(x) dx + c_1 M \gamma_1 \bar{F}(t) + c_2 M \gamma_2 F(t) - C[t + \bar{F}(t) M \gamma_1 + F(t) M \gamma_2].$$

Пусть система стареющая и ее интенсивность отказов $\lambda(t) = \frac{1}{\bar{F}(t)} \frac{dF(t)}{dt}$ – неубывающая функция и исходные данные должны быть такими, что при оптимальном обслуживании функционирование системы должно приносить положительный эффект $C \geq 0$.

Анализируем свойства производной

$$\frac{dC(t)}{dt} = (c_4 - C) + \bar{F}(t) \{ (c_0 - c_4) + [(c_2 - C) M \gamma_2 + (c_1 - C) M \gamma_1] \lambda(t) \}. \quad (22)$$

При принятых ограничениях функция (22) невозрастающая, она либо сохраняет знак, либо один раз меняет знак с плюса на минус. Так как $\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{dC(t)}{dt} < 0$, то можно сделать вывод, что функция (22) либо сохраняет отрицательный знак, либо один раз меняет знак с плюса на минус. Таким образом доказано, что функция $C(t)$ имеет максимум в некоторой конечной точке, т.е. для функции $C(t)$ выполняются условия доказанной выше теоремы. Поэтому максимум функционала (21) достигается на функции (11), а параметр t_1 определяется как точка максимума функции

$$\frac{\int_0^{\tau} A(t) dG_1(t) + A(\tau)(G_2(\tau) - G_1(\tau)) + \int_{\tau}^{+\infty} A(t) dG_2(t)}{\int_0^{\tau} AB(t) dG_1(t) + B(\tau)(G_2(\tau) - G_1(\tau)) + \int_{\tau}^{+\infty} B(t) dG_2(t)},$$

при

$$A(t) = c_0 \int_0^t \bar{F}(x) dx + c_4 \int_0^t F(x) dx + c_1 M \gamma_1 \bar{F}(t) + c_2 M \gamma_2 F(t),$$

$$B(t) = t + \bar{F}(t) M \gamma_1 + F(t) M \gamma_2.$$

2. Управляемые модели безопасности

С исследованными выше управляемыми моделями надежности тесно связаны модели безопасности. Технические системы осуществляют защиту информации, парируют угрозы нормальному процессу функционирования, которые могут создать злоумышленники. Поэтому качественное обслуживание систем защиты является первостепенной задачей в обеспечении безопасности функционирования любой системы [9, 10].

В описанный выше процесс проведения восстановительных работ введем процесс попыток нарушить штатный процесс функционирования исследуемой системы. Будем считать, что эти моменты попыток образуют пуассоновский поток с параметром λ . Из описания процесса функционирования системы и проведения восстановительных работ следует, что периоды исправного функционирования чередуются с периодами, когда в системе проводятся восстановительные работы или система находится в состоянии скрытого отказа (модель с отсутствием самостоятельной индикации отказа).

Попытку назовем успешной (катастрофой), если она попадает на период проведения восстановительных работ или на период скрытого отказа. Очевидно, необходимо максимизировать математическое ожидание времени до момента катастрофы.

Обозначим математическое ожидание времени до момента катастрофы при условии, что в начальный момент $t_0 = 0$ начинается эксплуатация новой системы $M_0(G)$, и поставим задачу *найти максимум* $\max_{G \in \Omega} M_0(G) = C = M_0(G^*)$ *и распределение* G^* , *на котором он достигается*.

Для модели с мгновенной индикацией отказа в работе [8] приведена зависимость этого математического ожидания от исходных характеристик

$$M_0(G) = \frac{\int_0^\infty \left[\int_0^u \bar{F}(y) dy + \bar{F}(u) \int_0^\infty e^{-\lambda t} \bar{F}_1(t) dt + F(u) \int_0^\infty e^{-\lambda t} \bar{F}_3(t) dt \right] dG(u)}{\int_0^\infty \left[1 - \bar{F}(u) \int_0^\infty e^{-\lambda t} dF_1(t) - F(u) \int_0^\infty e^{-\lambda t} dF_3(t) \right] dG(u)}. \quad (23)$$

По условиям теоремы и леммы необходимо исследовать функцию

$$C(t) = \left[\int_0^t \bar{F}(x) dx + \bar{F}(t) \int_0^\infty e^{-\lambda x} \bar{F}_1(x) dx + F(t) \int_0^\infty e^{-\lambda x} \bar{F}_3(x) dx \right] - C \left[1 - \bar{F}(t) \int_0^\infty e^{-\lambda x} dF_1(x) - F(t) \int_0^\infty e^{-\lambda x} dF_3(x) \right]. \quad (24)$$

Далее отметим естественные физические предположения: система стареющая, т.е. опасность отказов $\lambda(t)$ – неубывающая функция, и внеплановый ремонт длится дольше планового, т.е. $F_1(x) \geq F_3(x)$, $x \geq 0$. Наконец, справедливо очевидное неравенство $1 - \lambda C \leq 0$. В этих условиях производная

$$\frac{dC(t)}{dt} = \bar{F}(t) \left[1 + (1 - \lambda C) \lambda(t) \int_0^\infty e^{-\lambda x} (F_1(x) - F_3(x)) dx \right] \quad (25)$$

либо сохраняет знак, либо один раз меняет знак с плюса на минус. Таким образом доказано, что для функции $C(t)$ выполняются условия приведенной выше теоремы. Поэтому максимум функционала достигается на функции (11), для которой параметр t_1 определяется как точка максимума функции (21) при

$$A(t) = \int_0^t \bar{F}(x) dx + \int_0^\infty e^{-\lambda x} \bar{F}_1(x) dx + F(t) \int_0^\infty e^{-\lambda x} (F_1(x) - F_3(x)) dx, \\ B(t) = 1 + \lambda \int_0^\infty e^{-\lambda x} F_1(x) dx + F(t) \lambda \int_0^\infty e^{-\lambda x} (F_1(x) - F_3(x)) dx.$$

Во всех примерах, если есть ограничения на математическое ожидание периодичности проведения восстановительных работ, необходимо вычислить первый момент для распределения (11) и сравнить с заданным значением.

Список литературы

1. Каштанов В. А., Зайцева О. Б. Исследование операций (линейное программирование и стохастические модели) : учебник. М. : ИНФРА-М, 2016. 256 с.
2. Каштанов В. А. О структуре функционала накопления, построенного на траекториях полумарковского процесса с конечным множеством состояний // Теория вероятностей и ее применения. 2015. Т. 60, № 2. С. 272–289.
3. Kashtanov V. A. Discrete distributions in control problems. Probabilistic methods in discrete mathematics // Proceedings of the Fourth International Petrozavodsk Conference. VSP, Utrecht, The Netherlands, 1997. P. 267–274.
4. Барзилович Е. Ю., Беляев Ю. К., Каштанов В. А. [и др.]. Вопросы математической теории надежности / под ред. Б. В. Гнеденко. М. : Радио и связь, 1983. 376 с.
5. Каштанов В. А., Зайцева О. Б., Ефремов А. А. Управляемые полумарковские процессы в условиях ограничений на стратегии управления и построение оптимальных стратегий в моделях надежности и безопасности // Математические заметки. 2021. № 109. С. 571–580.
6. Барзилович Е. Ю., Каштанов В. А. Некоторые математические вопросы теории обслуживания сложных систем. М. : Советское радио, 1971. 272 с.
7. Каштанов В. А., Медведев А. И. Теория надежности сложных систем. М. : Физматлит, 2010. 608 с.

8. Каштанов В. А. Стратегия технического обслуживания на основе полумарковских процессов с конечным множеством состояний // Надежность и качество сложных систем. 2013. № 1. С. 41–46.
9. Бецов А. В. Безопасность и надежность системы защиты объекта // Надежность и качество сложных систем. 2013. № 1. С. 35–40.
10. Зайцева О. Б., Каштанов В. А. О минимаксных подходах в задачах безопасности // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. Сер.: Математическое моделирование и информационные технологии. 2013. Вып. 4, № 1. С. 55–67.

References

1. Kashtanov V.A., Zaytseva O.B. *Issledovanie operatsiy (lineynoe programmirovaniye i stokhasticheskie modeli): uchebnik = Operations Research (linear programming and stochastic models): textbook*. Moscow: INFRA-M, 2016:256. (In Russ.)
2. Kashtanov V.A. On the structure of the accumulation functional constructed on the trajectories of a semi-Markov process with a finite set of states. *Teoriya veroyatnostey i ee primeneniya = Probability theory and its applications*. 2015;60(2):272–289. (In Russ.)
3. Kashtanov V.A. Discrete distributions in control problems. Probabilistic methods in discrete mathematics. *Proceedings of the Fourth International Petrozavodsk Conference*. VSP, Utrecht, The Netherlands. 1997:267–274.
4. Barzilovich E.Yu., Belyaev Yu.K., Kashtanov V.A. [et al.]. *Voprosy matematicheskoy teorii nadezhnosti = Questions of the mathematical theory of reliability*. Moscow: Radio i svyaz', 1983:376. (In Russ.)
5. Kashtanov V.A., Zaytseva O.B., Efremov A.A. Controlled semi-Markov processes under constraints on management strategies and the construction of optimal strategies in reliability and security models. *Matematicheskie zametki = Mathematical notes*. 2021;(109):571–580. (In Russ.)
6. Barzilovich E.Yu., Kashtanov V.A. *Nekotorye matematicheskie voprosy teorii obsluzhivaniya slozhnykh sistem = Some mathematical questions of the theory of maintenance of complex systems*. Moscow: Sovetskoe radio, 1971:272. (In Russ.)
7. Kashtanov V.A., Medvedev A.I. *Teoriya nadezhnosti slozhnykh sistem = Theory of reliability of complex systems*. Moscow: Fizmatlit, 2010:608. (In Russ.)
8. Kashtanov V.A. Maintenance strategy based on semi-Markov processes with a finite set of states. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2013;(1):41–46. (In Russ.)
9. Betskov A.V. Safety and reliability of the object protection system. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2013;(1):35–40. (In Russ.)
10. Zaytseva O.B., Kashtanov V.A. About minimax approaches in security problems. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk. Ser.: Matematicheskoe modelirovaniye i informatsionnye tekhnologii = Proceedings of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. Ser.: Mathematical modeling and information Technologies*. 2013;4(1):55–67. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Виктор Алексеевич Каштанов

доктор физико-математических наук, профессор,
Национальный исследовательский университет
«Высшая школа экономики»
(Россия, г. Москва, ул. Мясницкая, 20)
E-mail: vakashtanov@hse.ru

Ольга Борисовна Зайцева

кандидат физико-математических наук, доцент,
доцент кафедры теории вероятностей,
Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)
(Россия, г. Москва, Волоколамское шоссе, 4)
E-mail: o_zaitseva@mail.ru

Viktor A. Kashtanov

Doctor of physical and mathematical sciences, professor,
National Research University
"Higher School of Economics"
(20 Myasnitskaya street, Moscow, Russia)

Ol'ga B. Zaytseva

Candidate of physical and mathematical sciences,
associate professor,
associate professor of sub-department
of probability theory,
Moscow Aviation Institute
(National Research University)
(4 Volokolamskoe highway, Moscow, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 20.03.2021

Поступила после рецензирования / Revised 30.03.2021

Принята к публикации / Accepted 31.03.2021

STATE-OF-THE-ART OF THE MANAGEMENT INFORMATION INFRASTRUCTURE OF ARCTIC REGION DEVELOPMENT: CHALLENGES, TRENDS AND LIMITATIONS

V.A. Putilov¹, A.V. Masloboev²

^{1,2} Federal Research Centre "Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences", Apatity, Russia
¹ putilov@iimm.ru, ² masloboev@iimm.ru

Abstract. *Background.* The study is aimed to development and analysis of the computer-driven technologies for resilience and safety risk-management of the critical infrastructures of regional socio-economic systems in the Arctic region of Russia. It is important to improving the quality of information support of the management activity in this dynamic problem domain. *Materials and methods.* In terms of systems and functional-target approaches the state-of-the-art, role and advanced directions of the information technologies and system development in respect to hot-button issues of regional management and needs of Arctic region have been analyzed. The place of information technologies in research and education, personnel support of regional economy, industrial ecology and socio-economic security management of the region are in detail considered. *Results and conclusions.* It is shown, that an efficient regional management in the Arctic region of Russia is impossible without use of the developed network-centric information infrastructure corresponding to goals and limitations of the Arctic region sustainable and safe development, as well as without systems integration and cooperation at the international level making the special demands to information technologies in the field of security support and management of the socio-economic systems. The ways to enhance the network-centric information infrastructure for the purpose of management of the Arctic region development are proposed.

Keywords: information technologies, management, regional development, quality, decision support system, safety, Arctic region

Acknowledgments: the work was carried out within the framework of the State Research Program of the Institute for Informatics and Mathematical Modeling of the Kola Science Centre of RAS (project No. 0226-2019-0035) and was partially sponsored by the Russian Foundation for Basic Research under grant No. 19-07-01193.

For citation: Putilov V.A., Masloboev A.V. State-of-the-art of the management information infrastructure of Arctic region development: challenges, trends and limitations. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2021;2:24–35. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2021-2-3

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ УПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЕМ АРКТИЧЕСКОГО РЕГИОНА: ВЫЗОВЫ, ТРЕНДЫ, ОГРАНИЧЕНИЯ

В. А. Путилов¹, А. В. Маслобоев²

^{1,2} Федеральный исследовательский центр «Кольский научный центр Российской академии наук», Апатиты, Россия
¹ putilov@iimm.ru, ² masloboev@iimm.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Исследование направлено на развитие и анализ компьютерных технологий управления жизнеспособностью и безопасностью критических инфраструктур региональных социально-экономических систем Арктической зоны России для повышения качества информационного обеспечения управленческой деятельности в этой динамичной области. *Материалы и методы.* С позиций системного и функционально-целевого подходов анализируются современная ситуация, роль и перспективные направления развития информационных технологий и систем применительно к актуальным проблемам регионального управления и потребностям Арктического региона. Подробно рассматривается место информационных технологий в научно-образовательной сфере, кадровом обеспечении региональной экономики, промышленной экологии и управлении социально-экономической безопасностью региона. *Результаты и выводы.* Показано, что

эффективное региональное управление в Арктической зоне России невозможно без использования развитой сетевой информационной инфраструктуры, соответствующей целям и ограничениям устойчивого и безопасного развития Арктического региона, а также без системной интеграции и кооперации на международном уровне, предъявляющих специальные требования к информационным технологиям в области обеспечения безопасности и управления социально-экономическими системами. Предложены пути совершенствования сетевой информационной инфраструктуры управления развитием Арктического региона.

Ключевые слова: информационные технологии, управление, региональное развитие, качество, система поддержки принятия решений, безопасность, арктический регион

Финансирование: работа выполнена в рамках государственного задания ИИММ КНЦ РАН (НИР № 0226-2019-0035) и частично поддержана РФФИ (проект 19-07-01193-а).

Для цитирования: Путилов В. А., Маслобоев А. В. Современное состояние информационной инфраструктуры управления развитием Арктического региона: вызовы, тренды, ограничения // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 2. С. 24–35. doi:10.21685/2307-4205-2021-2-3

Introduction

The Arctic region of Russia (ARR) comprises the areas of the Murmansk, Arkhangelsk and Krasnoyarsk regions, Republics of Karelia, Komi and Sakha (Yakutia), Nenets, Chukchi, Yamal-Nenets autonomous areas. The main peculiarities of the ARR are the following:

- they are mainly raw material resource areas and their importance is permanently growing due to exploitation of newly discovered oil and gas deposits;
- the climate of the areas is severe and in some places extremely hard, vast territories are scarcely populated whereas the systems of communications habitual for more southern areas are lacking;
- the nature is extremely vulnerable and slowly restorable and in some places the aftereffects of the technogenic activity are often irreversible.

This unfavorable combination of the factors has become mostly evident recently. There is observed a damaging basic break going in every sphere that has been caused by objective reasons common for Russia. On the other hand, there is a strong understanding that it is impossible to continue living as before. Thus, the subjective basis for reformation has been provided.

The model of "sustainable development" [1] comes into use more actively. The concept of "sustainable development", first of all, is supposed to grant exploitation of the regional resources so that the interests of both the present and the future generations are taken into account. So the principal basis to regulate various activities in the ARR is restricted by the following factors:

- 1) Restricting activities in exploiting and processing of the nature resources that cannot be satisfied from other resources, to the amounts necessary to meet only vital needs.
- 2) Restraining the requirements to keep ecological discipline up to forbidding industrial activity causing overloadings on ecosystems (recultivation of damaged nature landscapes during and after completing industrial activity).
- 3) Controlling demographic situation in the region to maintain the number of non-indigenous able-bodied population at the necessary minimum level (special social and demographic policy to the indigenous people).
- 4) Maintaining the necessary ratio between damaged and untouched territories to secure ecological balance in the region; preserving the nature genofond and securing the conditions for traditional activity of the indigenous people.

Regional, interregional and international cooperation and integration for sustainable development of the ARR demand a mighty information support. The information infrastructure constitutes a very important element of the ARR regional infrastructure that backs up the development of the region in spite of the mentioned restrictions. Here information technologies are the elements of this infrastructure. To specify the role and place of the information technologies for the development of ARR it is necessary to analyze the global aims of establishing the Regional Information Infrastructure (RII) [2]. The global aim of the RII is to insure the level of information support that can meet the demands of the present time. This level is determined by completeness, exactness and promptness in delivering the information. Thus, when establishing and developing the RII it is necessary to decide if the current level of information support fits the challenges of ARR development. This is only the first problem. The second problem arises in case if such a level is not enough and it is necessary to define the level of information support necessary for today, for tomorrow and further on. This means what kinds of information are needed with what exactness and promptness. If it turns out

that the level of information support is not enough and it is impossible to raise it by simple quick measures (e.g., by organizational means) and it is necessary to establish or develop the existing information technologies then this will constitute the third problem.

The answer to the first problem is evident. The level of information support is surely insufficient. This refers to coordinated solving of the majority of problems which appear at the regional, interregional and international levels.

It is not so easy to get an answer to the second problem, since here it is dealt with the system task of information analysis of the problem. This problem is to be solved in every case by its own intensity. Sometimes it is enough to analyze the problem qualitatively that is to define what kind of information is needed as well as its exactness and promptness. But very often it is necessary to apply special computer-aided methods and models in order to settle the second problems.

To obtain the answer to the third problem the world practice recommends to use local and distributed computer networks, data bases, including those with distant access, as well as developed means of information processing and presentation such as maps, graphs and tables. There is a great variety of such means. It is not so easy just to choose what exactly is needed to adjust the means for specific task and develop the missing elements. Here it must be kept in mind not only the needs of today, but it is important to minimize the costs for rearranging the given information technologies for the coming challenges of tomorrow.

Problem statement

The answers to all the three questions discussed above make it possible to create the information technologies that secure achieving a corresponding level of information support. In this case the main problems of RII can be settled. They are the following:

1. The information support of socio-economic processes within the ARR taking into account both the aims and restrictions of the regional sustainable development as a whole, and the interregional and international relations. There might be arranged information acquisition, retrieval, processing, transfer and representation of each data type in the form acceptable for the most user categories. In other words, this is a problem of creating a regional information fund of the ARR with methods and means of its arranging, developing and using.

2. The information support of decision-making at various levels of regional management. It is necessary to provide the necessary information acquisition and analysis to be able to assess decision versions, to choose a certain decision version or several versions. The chosen version and its alternatives are to be conveyed to the decision maker.

3. The formation and development of population information needs of the region. Here it is meant that the necessary conditions are created for a person to be interested in raising the level of the personal information support. This is a very important problem since the information technologies won't be retrieved if this problem is not solved. For particular technologies these challenges become specifically target oriented.

Considering international cooperation in ARR the information technologies become very prominent, because the region has become involved in close cooperation with the countries of Northern Europe with their historic, linguistic, cultural, and other peculiarities. The level of applying the information technologies differs greatly. In the Scandinavian countries this level is traditionally very high. The ARR has always been retarded in this field, especially as compared with the Scandinavian neighbors. Thus, when developing the regional information infrastructure of the ARR the first and foremost task is to "pull" the region into the process of assimilating the information resources for prospective regional development. Then it will be reasonable to elaborate a new strategy mostly acceptable for the ARR conditions that can provide using the information technologies in the areas preferable for the region.

Challenges and preferable areas of IT application in the ARR

The recent years in developing the information technologies in the Russian North have demonstrated a line of priority areas in using these technologies to promote development of the region. For example, the joint Norwegian-Russian projects "Barents ICT Cluster", "Barentswatch", "Barentsmap" and "Barentsnet" [3] concentrate on the problems of "pulling" the ARR into applying the global information resources and creating the common information environment. The projects draft a direct input for Russian users into the global network Internet as well as access to the data bases of the Russian participants through this network. These projects seem very prospective first of all because they lay down the basis for further creation and devel-

opment of information technologies of the Russian North. The Russian side gets the access to information resources of the western neighbors and a possibility to use modern reliable prompt methods of access. This will surely become an important stimulus to provide an access through the Internet to the existing and newly developed information resources in the ARR. Thus, a common united information environment will be created throughout Northern Europe.

Information technologies in the formatted and newly forming preferable directions of interregional and international integration and cooperation constitute another class of prospective information technologies.

The first class deals with the information technologies in nature resources exploration (forests, fish, mineral resources, oil, gas, etc.). Here one of the main problems is creation of data bases. To solve the problems of integration and cooperation it is necessary to make these data bases accessible by standard means of distance access. Probably it will become necessary to obtain sanctioned access. But these problems can be easily solved in case of mutual interests.

The second vast class of information technologies considers ecological problems. Here it is meant a creation of data bases on polluting sources, models to forecast ecological conditions of the regions, monitoring and prediction of seismic and radiation hazards. Such information technologies have been included into many international projects and are under intensive development now.

The information technologies to solve ARR socio-economic problems are the one of very important class. Here it is meant data bases on population, enterprises, and some other statistical data for the region. The information technologies for sociological analysis and forecast of labour resources in the regions of mutual interest are under development now (e.g., the Finnish-Russian project for the region "Kandalaksha-Alakkurti-Salla"). These technologies are aimed at short term and middle term forecasting and sociological monitoring of able-bodied population of the region.

The areas of information technologies application mainly coincide with the common areas of computer-driven technologies usage adopted in the western countries the only difference being the time lag of information technologies developing attributed to Russia. Note, that in the ARR and Russia as whole information technologies are also widely used in private life, distance education, telemedicine and some other applications typical for the West.

Then, there will be distinguished the following areas of information technologies application preferable for the ARR (the succession is presented according to the time period of using computer equipment):

1. Scientific organizations of the Russian Academy of Sciences;
2. Industrial research institutions;
3. Education (colleges, comprehensive secondary schools, universities);
4. Enterprises of various forms of property;
5. Banks;
6. Administrations of cities and regions.

Computer facilities have been used by academic science and industrial research institutions for a long time already. As long as 50 years ago primitive huge computers were used for scientific calculations. Computer using has never stopped. Computer facilities have always been used by science for calculations and then for computer-aided experimental research including collecting and real-time processing of experimental data.

Computer-aided systems that were designed in scientific research institutions have significantly influenced the development of information technologies in industries. Only not long ago various industries were the main application areas of information technologies in science. But the situation has greatly changed recently. The economic industrial crises put an end to this process and many interesting and useful information technologies for industries have been left behind unclaimed. Nowadays industrial research institutions appear to be in very hard conditions. Some of them are disintegrated, others changed fields of research using their potential. Thus, the former geological survey organizations are now working at land cadastre that is financed by the Federation. The Institute of Micro-Electronics can be given as another example. Here the number of the employees has been greatly reduced, but the profile has been retained. It is also financed by federal programs.

Frankly speaking, industrial research has never played a prominent role in the region. Now there are only very few organizations that are of real importance.

Using computer facilities for education started in the region about 25-30 years ago (in Moscow this happened much earlier). This began with classes equipped with symbol displays and then transformed into PC-equipped classes. They were used for teaching computer science, namely computer architecture, com-

puter languages, graphic means, data bases, etc. Nowadays computers are used to teach other subjects. New computer-aided programs are being created and applied. This trend is especially typical for universities. Here information technologies applied for teaching purposes are under constant supervision. There is a special institute named "The Centre of Innovative Information Technologies" in Petrozavodsk University that is aimed to introduce information technologies into the educational processes.

State industrial enterprises started to use computer facilities under the state program "Computer-Aided Control of Production", i.e. at late 60-es early 70-es. At that time more or less large enterprises established Computer Centers with powerful EC computers (similar to IBM 360/370) and efforts were made to shortly develop computer systems to manage the enterprises, to provide their efficiency, flexibility and so on. Due to various reasons this global state program failed, but the enterprises were equipped by computers and thus at first they were mainly engaged in wage accounting and controlling material supply at the storeshops. Later on the scope of using information technologies greatly changed from enterprise to enterprise and varied from complete absence of information technologies to well computer-equipped enterprises. This is true for both economic management of an enterprise and controlling the technological processes. It's worth noting that there are not so many (only few) enterprises with well developed information technologies in the Russian North and the progress has been achieved here in cooperation with research scientific institutions.

Bank structures are the new sphere of informatization of Russia within the implementation of the state program "Digital economics". It goes without saying that the Central Federal Bank has been always equipped with high quality computers, but the situation in the regions has been quite different. The number of banks has risen significantly lately and their needs for informatization have been formed. Note that banks are the richest organizations in Russia now. They haven't got any problems with financing information technologies. They introduce special closed bank systems developed by their employees and don't allow any outsiders in.

City and region administrations are also new establishments though they use many of the former executive authority officials. In reality the needs for informatization are quite evident, i.e. systems to decision-making support are badly needed. But in practice applying of information technologies greatly varies from city to city. For example, the level of applying information technologies in Apatity City Administration is rather high: there exist special data bases on labour resources, unemployed, housings, enterprises, etc.; there is a connection to the Internet and to the government information network which is a system for computer-aided clerical work and public service rendering, and some others. There are computer facilities in the administrations of each city, but in some administrations the computers are used only for document processing.

Recently there appeared in the region a lot of private firms and joint stock companies that claim to work in the sphere of information technologies. But in reality such firms are mainly dealers and suppliers of hardware and software and have nothing to do with developing and introducing specifically oriented computer technologies since challenges need much time and not only interest.

Information technologies in science and education are mostly developed in the ARR. Until now science and education have accumulated the best specialists and experts that, in combination with the experience accomplished during the previous years, provides a solid basis for information technologies developing which can meet not only their own needs. Information technologies are spreading from here to other areas, i.e. industries, administrations, private and joint stock companies, and sometimes to banks. Until lately there existed traditional centers of information technologies developing, namely the Kola Science Centre (Apatity and Murmansk cities), Petrozavodsk State University, Karelian Science Centre (Petrozavodsk city). Recently information technologies have been successfully developed in Arkhangelsk too (Northern Arctic Federal University). The main directions of information technologies developing in scientific and educational centers will be considered further.

IT for management of industrial-ecological processes in the ARR

Here the following industries will be mainly mentioned: forestry, woodworking, pulp industry, ore mining, chemical processes, fishing, regional energy sector. The information technologies generally apply specific computer-aided models for technological processes, e.g. simulation or balance models. Various tasks can be solved on the basis of these models, e.g. management of electric energy transfer, optimization of fishing, cost efficiency in forestry, etc.

Developing of information technologies to management support of regional energy sector is well studied in [4, 5]. The information technologies provide data collection, storage, processing, and representation of the energy producing objects. A conceptual framework of the decision-making support system of regional power supply is shown in Fig. 1.

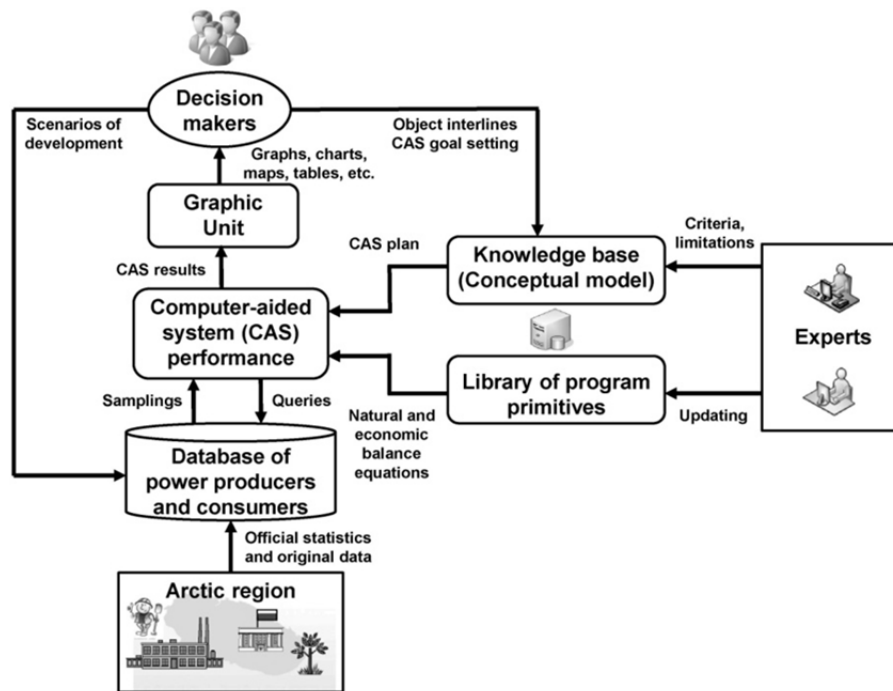


Fig. 1. Decision-making support system of regional power supply

This system uses the energy databases with the structure which corresponds to the structure accepted for representation of the regional system of energy production. The data on four types of indices for energy producing enterprises are inputted and analyzed (atomic, hydro, heat-electric plants, various types of boiler shops). These indices include characteristics on energy production, the equipment involved, raw materials, pollutants, and some other economic indices. The user is supplied with the following menu options: calculation on the whole region, an administrative unit or, a chain of hydroelectric stations, and so on. For the first two variants there can be calculated the summed up characteristics of all the energy producers, as well as different types of producers, etc. The user chooses the necessary set of indices. The sets can greatly vary. The results are presented in tables or graphs. The results can support short term and long term solutions to manage the regional energy sector.

At present the trend of applying information technologies to solve the environmental and industrial safety problems of the ARR is presented by a wide range of investigations [2, 4, 6] that are intensively under development, but not always completed. Information technologies are essentially used to evaluate seismic security of the ARR by NORSAR and Kola Science Centre RAS. There are developed special information technologies to control security at nuclear power underground stations [7], and, in the first place, especially radioactive wastes storages [8]. There have been developed the models of transferring radioactive wastes from the Kola Nuclear Power Station. These models utilize a special body of mathematics tested on other polluting sources.

Here the experience of developing the information technologies for insuring the security at ore mines is widely used. This is of vital importance since the problem of technogenic seismicity, the so called rock bursts, comes forth. The information technology of monitoring and prediction of rock bursts in the Khibiny mountains (where apatite is excavated) [5] applies the computer-aided monitoring system of induced seismology, acoustic and electro-magnetic emission, deformation of the rock mass. Various methods of evaluation of stress conditions are being tested as well as the methods of prediction and prevention of rock bursts are being developed. The developed computer-aided prediction technology uses monitoring and numerical modeling methods combined with the methods of artificial intelligence [9]. The latter formalizes and represents special knowledge in the computer system for the field under investigation. Architecture and components of the forecasting system of rock bursts at the underground mine are shown in Fig. 2.

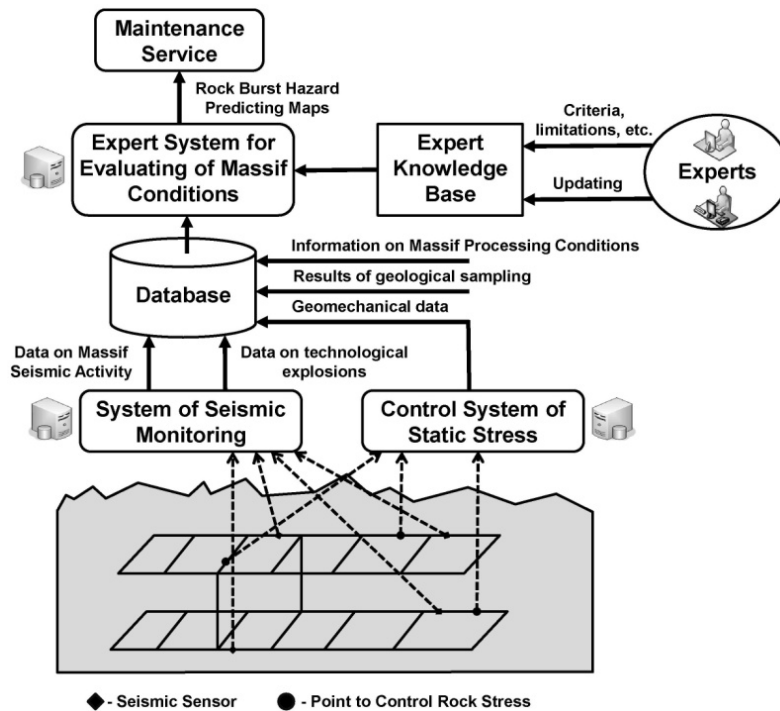


Fig. 2. Forecasting system of rock bursts at the underground mine

Computer-aided system for retrospective analysis and ecological mapping of the ARR under technogenic impact [4, 5] is another example of applying information technologies. This system is designed for operative diagnosis and monitoring of forest ecosystems, especially under technogenic impact. The information technologies are used to analyze ecological aftereffects of industrial activity. This analysis provides operative economic large-scale monitoring over forest ecosystems of the region. The dynamics of anthropogenic impact is reflected topographically for a long term period (60 years, approximately). This makes a basis for developing predicting estimations. The system includes some means to adjust it to particular natural-climatic conditions and, therefore, can be used in different areals: from taiga to broad-leaved forests. Some possible application fields for the system are the following:

- the retrospective dynamic analysis of the technogenic impact to forest ecosystems up to the regional scale;
- the structure clusterization of a forest plantation using some methods of multi-spatial statistic analysis;
- the science-proved support for decision-making in planning of ecological investigations of forest ecosystems;
- the monitoring and prognosis of the state of forest areas in the sense of the integrative index of quality: the decrease of the increment in volume.

All quantitative estimates in the model are based on using of some integral index. This index determines the scale for measuring both external influences and model parameters. The annual diameter increase of conifers has been taken as the index for Kola Peninsula.

The extrapolation tasks break down into subtasks of ecosystem change prognosis because of surrounding influences and internal movements. The latter can be solved properly by using some standard statistic methods, when the prognosis log is comparatively short (thirty-fifty years). Extrapolation of the influence of the external factors is needed in solving the following subtasks: prognosis of the external factors themselves, estimation of effect coefficients of probable combination of these factors on the ecosystem state and the prognosis of the ecosystem state. This information technology has been used to evaluate the conditions in Kola forests.

IT to solve socio-economic problems of the ARR

The computer-driven technologies to solve socio-economic problems of the ARR constitute an information basis for decision-making on regional socio-economic system management. The technologies

based on geographic information system (GIS) technologies are incorporated here. GIS-technologies appeared in the areas of the ARR about 30 years ago. The fields of GIS application are the same as in the West. Another field of information technologies is computer-aided systems aimed at predicting socio-economic development of the region. It is impossible to construct fully formalized models in the given subject domain. Information technologies work with non-formalized knowledge [5, 10]. Specialists and experts in specific problems of the given subject domain possess such knowledge. There exist different approaches to construct the knowledge processing. All this processing is combined by availability of the knowledge bases. There the expert knowledge is distinguished. The knowledge is inputted into the knowledge base and is processed according to certain rules.

The models of regional development are built in the form of scenarios. Scenarios are described by specific mathematical (algebraic) equations for computer-aided analysis that represents the inner image of the scenarios. The outer (for the user) image is given in graphics.

Thus, using the content of the knowledge bases on interrelations within the socio-economic system one can create scenarios of the system behavior under different inner and outer impacts. Moreover, the parameters of the scenarios can be evaluated and thus probable outcomes of the decision-making can be analyzed. Accuracy and reliability of such an analysis is greatly determined by reliability of different kinds of the knowledge inputted into the knowledge base. The developed IT-based methodology to solve socio-economic problems in the field of regional security control of the ARR is schematically represented in Fig. 3.

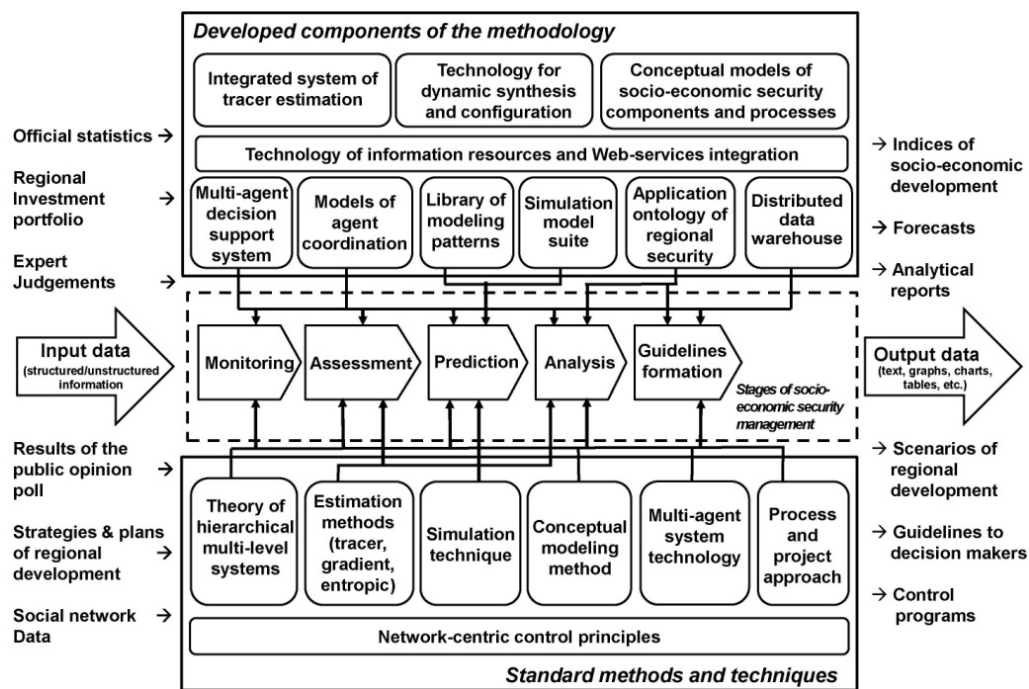


Fig. 3. The methodology for management information support of the ARR socio-economic security

The problems of personnel security and cooperation and integration in higher education are the key problems for the ARR [11]. It is only natural that purposeful higher education can lead both the present and coming generations of the ARR citizens to efficient cooperation. Thus, for the ARR it seems prospective to develop a management system of personnel security [12] to support the ARR regional economy and at the same time a relative network system of distance higher education [13] in the ARR elaborated for implementation of international educational programs.

The information technologies in education are a very important object for computer-aided system application [14], where it can be the only possible effective means of integration and cooperation. In fact, global information networks are providing a favorable environment to transfer educational information, whereas a student working station ensures visual representation of this information and thus individual education can be arranged. Generally, the problem of establishing a network-centric management system for information and analytical support of personnel security and higher education in the ARR [15] applying state-of-the-art information technologies is of vital importance. A conceptual scheme of information technology for management support of personnel security of the ARR is shown in Fig. 4.

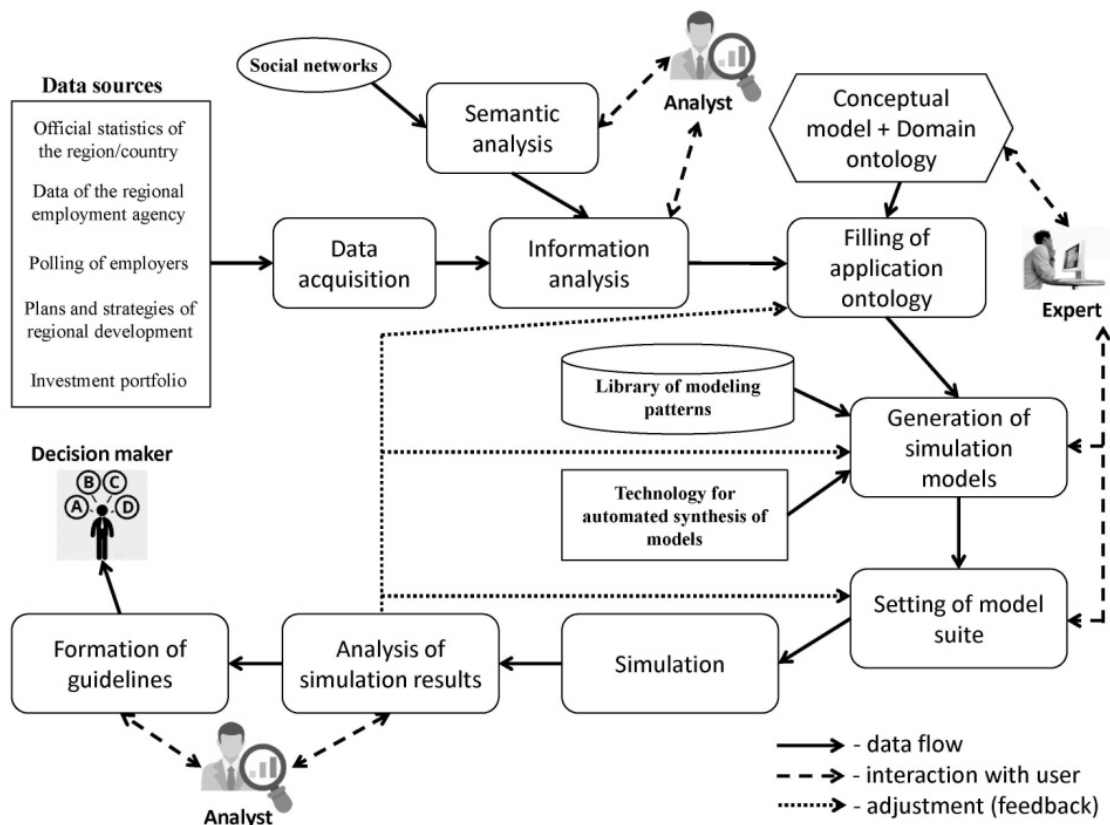


Fig. 4. Information technology for management support of personnel security of the region [16]

Here the process is well under way already. A good historical example started in practice in the 90s is the international Swedish-Russian project to establish an information system for management support of higher education in the Barents region. This project endeavors to solve the problems of integration of information technologies in higher education. The participants of the project were: the University of Umea, Petrozavodsk University, Kola Branch of Petrozavodsk University and other educational organizations. The project was aimed at establishing a distributed management system of higher education support that comprised three centers, namely Umea, Petrozavodsk and Apatity which were connected through Internet. As has been agreed, first of all it was planned to organize distance education for Russian students and personnel (manpower) training for industrial companies of the ARR in such educational programs as information security, tourism and service, international economics, modern logistics, etc. This choice is accounted by the fact that the small number of specialists available at the Russian North at present cannot provide education in these fields to a great number of students and re-educating specialists. The university courses in the mentioned disciplines do not meet the present need for knowledge. Thus, here any help extended by the western countries in arranging such courses may be of extreme importance. Then the problem of tutoring will arise. This problem can be successfully settled by using the methods and means of modern information technologies. Another example which can be mentioned is the state-of-the-art cooperative network of universities, colleges, research institutes and other business and governmental organizations from Russia and other Northern countries interested and concerned with education and research in the ARR. This project is called UArctic (The University of the Arctic). Through forging partnership and cooperation in research and education members of the UArctic enhance human capacity in the ARR, promote resilience and security of ARR critical infrastructures and ARR sustainable socio-economic development.

And, in fine, information technologies in solving of medical and biological problems of the human adaptation in the ARR, i.e. telemedicine. The prospects to use information technologies for health care in the specific North regions are quite evident and do not need any advocacy.

Conclusion

The given list of preferable areas is not full but, to our mind, it incorporates many areas of mutual interests for the regions in Northern Europe and Russia, including the ARR. This list reflects the targets and

restrictions of sustainable development of the ARR so that the information technologies are playing an important role in the ARR. The importance of information technologies will be rising without doubt in future.

There are two sets of problems that hamper the development of information technologies in the needs of the ARR. There are the problems of internal and external integration [17].

The first set is characterized by absence of regional IT-programs developed for the Russian part of the Arctic that could somehow coordinate the efforts of various organizations. The main reason here is the absence of financing support of such programs both on the regional and federal levels. Moreover, there are no hopeful prospects since the northern regions of Russia have got losing budgets. Thus, the priorities of informatization [18] are far from the most urgent as compared with the problems of paying out civil workers wages, unemployment benefits, etc. That is why in practice other sources for financing information technologies development are used. Here the program "Informatization of Karelia" is rather an exception. The program has been formulated and even a large conference has been held. But the financing of the program is supposed to be at the expense of the participants. The Karelian Government promised only to allocate an insignificant sum of money to support this program.

As it was assigned in study [18], there are some other reasons that hold back the general development of information technologies in the ARR. There are crises in science and research, reconstruction of industries and some others. Analysis of these reasons and their consequences are far beyond the scope of this paper. Information technologies are designed and developed as applied to the needs of certain enterprises or regions and until now without any reference to the needs of international cooperation. That follows the problem of external integration. Within the ARR such investigations addressed to solve this problem must be integrated with the investigations in other countries. The necessary adjustments in accordance with the international needs of the ARR development must be made.

The contributions and outcomes of our study are used under realization of the Strategy of ARR development and national security support until 2035 in the area of Murmansk region as the proposals and guidelines to enhancement of the management information infrastructure of regional sustainable development and safety.

References

1. Uskova T.V. *Upravlenie ustoychivym razvitiem regiona = Managing the sustainable development of the region*. Vologda: ISERT RAN, 2009:301. (In Russ.)
2. Masloboev A.V., Putilov V.A. *Informatsionnoe izmerenie regional'noy bezopasnosti v Arktike = Information dimension of regional security in the Arctic*. Apatity: KNTs RAN, 2016:222. (In Russ.)
3. Masloboev A.V. Implementation of cross-border IT projects in the field of information support for integrated security of the development of the Arctic regions: state and prospects. *Informatsionnye resursy Rossii = Information resources of Russia*. 2014;(3):13–20. (In Russ.)
4. Fridman A.Ya. *Situatsionnoe upravlenie strukturoy promyshlenno-prirodnykh sistem. Metody i modeli = Situational management of the structure of industrial and natural systems. Methods and models*. Saarbrücken, Germany: LAMBERT Academic Publishing, 2015:540. (In Russ.)
5. Emel'yanov S.V., Popkov Yu.S., Oleynik A.G., Putilov V.A. *Informatsionnye tekhnologii regional'nogo upravleniya = Information technologies of regional management*. Moscow: Editorial URSS, 2004:400. (In Russ.)
6. Yakovlev S., Putilov V., Masloboev A. Information and analytical support for the industrial and ecological safety management of Arctic communications. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019;302:012032
7. Mel'nikov N.N. [et al.]. *Nauchnye osnovy sozdaniya podzemnykh kompleksov dlya razmeshcheniya atomnykh stantsiy maloy moshchnosti v usloviyakh Arktiki = Scientific bases for the creation of underground complexes for the placement of low-power nuclear power plants in the Arctic*. Apatity: FITs KNTs RAN, 2020:304. (In Russ.)
8. Melnikov N.N., Amosov P.V. Migration model to estimate safety of ultimate underground disposal of high-level waste and spent fuel in hard rocks. *Gornyi Zhurnal = Mining Magazine*. 2015;(10):51–54.
9. Russell S., Norvig P. *Iskusstvennyy intellekt. Sovremennyy podkhod = Artificial intelligence. A modern approach*. Moscow: Vil'yams, 2007:1408. (In Russ.)
10. Tsygichko V.N. *Prognozirovanie sotsial'no-ekonomicheskikh protsessov = Forecasting of socio-economic processes*. Moscow: Knizhnyy dom «LIBERKOM», 2009:240. (In Russ.)
11. Oleynik A., Bystrov V., Khaliullina D. Solution for information and analytical support of staffing management in the Arctic zone of the Russian Federation. *Czech Polar Reports*. 2017;7(2):195–205.
12. Bystrov V.V., Khaliullina D.N., Malygina S.N. Development of the information support system components for personnel security management of the region. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020;1226: 348–361.

13. Yurkov N.K., Yakimov A.N. Opportunities and problems of distance education in universities in technical specialties. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2020;1:176–178. (In Russ.)
14. Yurkov N.K. *Intellektual'nye komp'yuternye obuchayushchie sistemy = Intelligent computer training systems*. Penza: Izd-vo Penz. gos. un-ta, 2010:304. (In Russ.)
15. Bystrov V.V., Masloboev A.V., Putilov V.A. Information and analytical support for personnel security management in the Arctic regions (Methodology and tools). *Arktika: ekologiya i ekonomika = The Arctic: ecology and economy*. 2020;(2):122–133. (In Russ.)
16. Bystrov V.V., Masloboev A.V., Putilov V.A. Information and analytical support for personnel security management in the Arctic regions. (Applications of developments on the example of the Murmansk region). *Arktika: ekologiya i ekonomika = The Arctic: ecology and economy*. 2020;(3):126–140. (In Russ.)
17. Dat'ev I.O. Development of infotelecommunication systems of the Arctic territories. *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN = Proceedings of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2014;(5):41–63. (In Russ.)
18. Putilov V.A., Shishaev M.G. Informatization of the region and its social effects. *Vestnik Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN = Bulletin of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2011;(1):44–54. (In Russ.)

Список литературы

1. Ускова Т. В. Управление устойчивым развитием региона. Вологда : ИСЭРТ РАН, 2009. 301 с.
2. Маслобоев А. В., Путилов В. А. Информационное измерение региональной безопасности в Арктике. Апатиты : КНЦ РАН, 2016. 222 с.
3. Маслобоев А. В. Реализация трансграничных ИТ-проектов в сфере информационного обеспечения комплексной безопасности развития арктических регионов: состояние и перспективы // Информационные ресурсы России. 2014. № 3. С. 13–20.
4. Фридман А. Я. Ситуационное управление структурой промышленно-природных систем. Методы и модели. Saarbrücken, Germany : LAMBERT Academic Publishing, 2015. 540 с.
5. Емельянов С. В., Попков Ю. С., Олейник А. Г., Путилов В. А. Информационные технологии регионального управления. М. : Едиториал УРСС, 2004. 400 с.
6. Yakovlev S., Putilov V., Masloboev A. Information and analytical support for the industrial and ecological safety management of Arctic communications // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 302. P. 012032
7. Мельников Н. Н. [и др.]. Научные основы создания подземных комплексов для размещения атомных станций малой мощности в условиях Арктики. Апатиты : ФИЦ КНЦ РАН, 2020. 304 с.
8. Melnikov N. N., Amosov P. V. Migration model to estimate safety of ultimate underground disposal of high-level waste and spent fuel in hard rocks // Gornyi Zhurnal. 2015. № 10. P. 51–54.
9. Расселл С., Норвиг П. Искусственный интеллект. Современный подход. М. : Вильямс, 2007. 1408 с.
10. Цыгичко В. Н. Прогнозирование социально-экономических процессов. М. : Книжный дом «ЛИБЕРКОМ», 2009. 240 с.
11. Oleynik A., Bystrov V., Khaliullina D. Solution for information and analytical support of staffing management in the Arctic zone of the Russian Federation // Czech Polar Reports. 2017. Vol. 7, no. 2. P. 195–205.
12. Bystrov V. V., Khaliullina D. N., Malygina S. N. Development of the information support system components for personnel security management of the region // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 1226. P. 348–361.
13. Юрков Н. К., Якимов А. Н. Возможности и проблемы дистанционного образования в вузах по техническим специальностям // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2020. Т. 1. С. 176–178.
14. Юрков Н. К. Интеллектуальные компьютерные обучающие системы. Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2010. 304 с.
15. Быстров В. В., Маслобоев А. В., Путилов В. А. Информационно-аналитическая поддержка управления кадровой безопасностью арктических регионов (Методология и инструментарий) // Арктика: экология и экономика. 2020. № 2. С. 122–133.
16. Быстров В. В., Маслобоев А. В., Путилов В. А. Информационно-аналитическая поддержка управления кадровой безопасностью арктических регионов. (Приложения разработок на примере Мурманской области) // Арктика: экология и экономика. 2020. № 3. С. 126–140.
17. Дат'ев И. О. Развитие инфотелекоммуникационных систем арктических территорий // Труды Кольского научного центра РАН. 2014. № 5. С. 41–63.
18. Путилов В. А., Шишаев М. Г. Информатизация региона и ее социальные эффекты // Вестник Кольского научного центра РАН. 2011. Вып. 1. С. 44–54.

Информация об авторах / Information about the authors

Владимир Александрович Путилов

доктор технических наук, профессор,
научный руководитель,
Институт информатики и математического
моделирования технологических процессов
Федерального исследовательского центра
«Кольского научного центра»
Российской академии наук
(Россия, Мурманская область, г. Апатиты,
ул. Ферсмана, 14)
E-mail: putilov@iimm.ru

Андрей Владимирович Маслобоев

доктор технических наук, доцент,
ведущий научный сотрудник,
Институт информатики и математического
моделирования технологических процессов
Федерального исследовательского центра
«Кольского научного центра»
Российской академии наук
(Россия, Мурманская область, г. Апатиты,
ул. Ферсмана, 14)
E-mail: masloboev@iimm.ru

Vladimir A. Putilov

Doctor of technical sciences, professor, scientific director,
Institute of Informatics and mathematical
modelling of technological processes
of the Federal Research Center
"Kola Science Centre"
of the Russian Academy of Sciences
(14 Fersmana street, Apatity,
Murmansk region, Russia)

Andrey V. Masloboev

Doctor of technical sciences, associate professor,
leading researcher,
Institute of Informatics and mathematical
modelling of technological processes
of the Federal Research Center
"Kola Science Centre"
of the Russian Academy of Sciences
(14 Fersmana street, Apatity,
Murmansk region, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 05.03.2021

Поступила после рецензирования/Revised 17.03.2021

Принята к публикации/Accepted 31.03.2021

УКРУПНЕНИЕ СОСТОЯНИЙ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ МАРКОВСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

Б. П. Зеленцов

Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Новосибирск, Россия
zelentsov@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Актуальность проблемы уменьшения размерности моделей надежности систем обусловлена тем, что увеличение числа состояний вызывает естественные трудности на всех этапах реализации модели, в частности, необходимость оперирования с характеристиками большой размерности. Целью статьи является краткий обзор подходов к проблеме укрупнения состояний моделей на основе однородных марковских процессов в дискретном или непрерывном времени, а также описание двух методов укрупнения, которые могут найти применение в инженерной практике. *Материалы и методы.* Эти два метода укрупнения состояний основаны на приведении характеристик к входным состояниям подмножеств, а также определении частот переходов между состояниями и подмножествами состояний. *Результаты.* Получена зависимость между характеристиками исходной системы и укрупненной системы с меньшим числом состояний. Особенность приведенных методов заключается в том, что характеристики системы, в том числе показатели надежности, не искажаются при переходе к укрупненной модели. *Выводы.* Методы могут быть использованы в инженерной практике при моделировании надежности сложных систем в стационарном режиме на основе марковских процессов в дискретном и непрерывном времени.

Ключевые слова: укрупнение состояний, моделирование надежности, матричные модели марковских процессов в дискретном и непрерывном времени

Для цитирования: Зеленцов Б. П. Укрупнение состояний при моделировании надежности технических систем марковскими процессами // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 2. С. 36–52. doi:10.21685/2307-4205-2021-2-4

AGGREGATION OF STATES OF MARKOV PROCESSES BY MODELING RELIABILITY OF TECHNICAL SYSTEMS

B.P. Zelentsov

Siberian State University of Telecommunications and Information Sciences, Novosibirsk, Russia
zelentsov@mail.ru

Abstract. *Background.* The relevance of the problem of reducing the dimension of systems reliability models is due to the fact that an increase in the number of states causes natural difficulties at all stages of the model implementation, in particular, the need to operate with characteristics of a large dimension. The purpose of the article is a brief overview of approaches to the problem of consolidation of model states based on homogeneous Markov processes in discrete or continuous time, as well as a description of two methods of consolidation that can find application in engineering practice. *Materials and methods.* These two methods of consolidation of states are based on the reduction of characteristics to the input states of subsets and on the basis of the frequencies of transitions between states and subsets of states. *Results.* The relationship between the characteristics of the initial system and the enlarged system with a smaller number of states is obtained. The peculiarity of the given methods is that the characteristics of the system, including the reliability measures, are not distorted during the transition to the enlarged model. *Conclusions.* The methods can be used in engineering practice when modeling the reliability of complex systems in a stationary mode based on Markov processes in discrete and continuous time.

Keywords: aggregation of states, modeling reliability, matrix models of Markov processes in discrete and continuous time

For citation: Zelentsov B.P. Aggregation of states of Markov processes by modeling reliability of technical systems. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2021;2:36–52. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2021-2-4

Введение

Одной из проблем в области моделирования надежности технических систем является большое число состояний и событий, которыми описываются модели систем. Такие системы называют большими или сложными. Эти системы зачастую состоят из большого числа элементов различного назначения, в них протекают разные физические процессы, они проходят разные фазы эксплуатации, среди которых можно отметить использование по назначению, техническое обслуживание и восстановление. При эксплуатации технических систем имеют место отказы и неисправности, непрерывный и периодический контроль технического состояния, разнообразные воздействия внешней среды. Особо следует отметить превалирующий характер вероятностных закономерностей при формировании моделей сложных систем. Поэтому сложные системы обычно относят к классу вероятностных систем.

Увеличение числа состояний вызывает естественные трудности на всех этапах реализации модели: при формировании множества состояний системы и исходных характеристик системы, необходимости оперирования с характеристиками большой размерности. В аналитических моделях систем большой размерности возрастает трудоемкость получения формул, а сами формулы настолько сложны, что их применение в инженерных расчетах практически не оправдано. Зачастую большое число состояний является существенным препятствием при моделировании функционирования систем. Эти обстоятельства определяют актуальность проблемы уменьшения размерности моделей систем.

Одним из основных путей преодоления трудностей, связанных с большой размерностью сложных систем, является укрупнение состояний, при котором система с данным числом состояний заменяется системой с меньшим числом состояний. Проблема укрупнения – это проблема преобразования первоначальной системы в систему с меньшим числом состояний, изучение которой с точки зрения получения выходных характеристик не приводит к существенной потере информации и искажению результатов моделирования. В связи с этим важное значение имеет развитие известных методов укрупнения состояний, разработка новых подходов к укрупнению состояний, а также доведение математически обоснованных методов до инженерной практики.

При формировании общего подхода к укрупнению состояний следует иметь в виду, что предложения по укрупнению состояний должны быть доказательными, так как произвольное объединение нескольких состояний в одно укрупненное состояние приводит к потере информации об исходной системе.

Так, модель надежности единичного электронного блока, проходящего три фазы эксплуатации (использование по назначению, периодические проверки и восстановление) описывается 10 состояниями и 22 событиями, которые учитывают разные виды отказов, наличие непрерывного и периодического контроля технического состояния, ошибки контроля, несколько состояний с необнаруженным отказом. Совокупность таких блоков может описываться множеством из сотен и тысяч состояний.

В данной статье приведен краткий обзор подходов к проблеме укрупнения состояний и описаны два метода укрупнения состояний, которые могут найти применение в инженерной практике.

Краткий обзор подходов к проблеме укрупнения состояний

Проблема укрупнения состояний не является новой. К числу ранних работ можно отнести, например, работы [1, 2]. В работе [3] рассмотрены условия существования так называемого «нулевого приближения» по схеме укрупнения [4]. Однако оценка погрешности здесь не производится и критерий «слабых связей» не обоснован. В работе [5] предложен метод декомпозиции, в соответствии с которым система разбивается на части таким образом, что она может быть представлена в виде последовательно соединенных частей. Метод декомпозиции применим при разбиении системы на независимые части (подсистемы). Исследованы условия декомпозиции. Если же подсистемы зависимы, то метод может привести к существенной погрешности при вычислении выходных характеристик системы. Декомпозицию можно рассматривать как метод диакоптики.

Математически обоснованные достаточные условия укрупнения марковской цепи заключаются в том, что множество состояний системы разбивается на подмножества, а матрица переходных вероятностей представляется в виде соответствующей блочной (клеточной) матрицы. Если сумма элементов каждой строки блока является постоянной, т.е. не зависит от номера строки этого блока, то такое множество состояний является укрупняемым: каждое подмножество может быть заменено одним состоянием. Сумма элементов строки блока является переходной вероятностью новой, укрупненной цепи [1, 4]. Аналогичные достаточные условия сформулированы для марковского про-

цесса в непрерывном времени, где в качестве характеристики переходов между состояниями используются интенсивности переходов [5, 6]. Сформулированные достаточные условия укрупняемости марковской цепи и марковского процесса обеспечивают «склеивание» состояний каждого подмножества и позволяют сохранить точные значения предельных вероятностей состояний укрупненной системы, при этом предельная вероятность нового, укрупненного состояния получается суммированием предельных вероятностей состояний соответствующих укрупняемых состояний исходного процесса. Однако практическое применение сформулированных достаточных условий укрупнимости затрудняется тем, что эта идея не доведена до метода, пригодного для применения в инженерной практике. В частности, не исследован вопрос о совокупности сохраняемых выходных характеристик системы.

Разработаны принципы фазового укрупнения, сущность которого заключается в том, что фазовое пространство исходной системы расщепляется на конечное число непересекающихся классов. Состояния каждого класса «склеиваются» в одно состояние, а вероятности исходных состояний суммируются. В новом, укрупненном фазовом пространстве строится укрупненная система [2]. Данный подход основан на асимптотических методах. Это дает возможность получить приближенные значения выходных характеристик исходной системы. Разработан метод приведения к входным состояниям, в соответствии с которым система с данным числом состояний приводится к системе с меньшим числом состояний [7]. Исходное множество состояний разбивается на непересекающиеся подмножества, в которых выделяются входные и выходные состояния. Укрупненное множество состояний является объединением входных состояний укрупняемых подмножеств. Информация об исходном множестве состояний определенным образом «упаковывается» в систему с меньшим числом состояний с сохранением (без потери точности) некоторых выходных характеристик исходной системы. Особенность этого подхода заключается в том, что обеспечивается изоморфизм исходной и укрупненной системы, в том числе укрупненная система сохраняет свойство марковости.

Так, в рамках сложных систем исследовано поведение бактерий, совершающих случайные движения, приведены эргодические теоремы и условия эргодичности [8]. В работе [9] рассмотрена асимптотическая сходимость статистических относительных частот событий, приведены аналитические выражения, описывающие процессы полимеризации и их подтверждение путем статистического моделирования.

В работе [10] выведены формулы для среднего времени возвращения в подмножество состояний марковского процесса в дискретном и непрерывном времени. Приведены условия существования предельных вероятностей. Переход от процесса в непрерывном времени к вложенной цепи Маркова позволил упростить аналитическую модель и довести ее до развернутых формул для вероятностей состояний и доказать сходимость вероятностей состояний к предельным [11].

В работах [12, 13] рассмотрена специфическая разложимая структура, названная «почти полностью разложимая цепь». В статье представлены алгоритмы, которые приближенно вычисляют характеристики цепи Маркова в дискретном времени. Алгоритмы основаны на том, что состояния цепи Маркова сгруппированы так, что вероятности изменения состояния внутри группы имеют более высокий порядок по сравнению с вероятностями переходов между группами. Эти алгоритмы позволяют вычислять предельные вероятности состояний, время перехода между состояниями, число попаданий в состояние до поглощения. Предложен древовидный метод вычисления этих характеристик для процесса с большим числом состояний. Метод позволяет приближенно вычислять предельное распределение вероятностей состояний.

С точки зрения охвата укрупнением множества состояний укрупнение может быть простым, когда множество состояний разбивается на два подмножества, и блочным, когда множество состояний разбивается на несколько подмножеств (блоков). В работе [14] приведен частотный метод моделирования случайного процесса при разбиении эргодического множества состояний на два подмножества, при этом вычисляются частоты переходов между этими подмножествами и другие характеристики этих подмножеств. Фактически исходный процесс может быть приведен к двум укрупненным состояниям. Ключевым понятием здесь является частота переходов между двумя состояниями исходного процесса в стационарном режиме. Средняя частота переходов между подмножествами состояний также является устойчивой характеристикой эргодического марковского процесса в стационарном режиме. Такой вид простого укрупнения можно было бы назвать «частотным укрупнением» состояний марковского процесса в дискретном и непрерывном времени. Этот подход может быть использован для моделирования систем длительного использования.

При большом числе состояний разбиение исходного множества на два подмножества не всегда является эффективным, оно не учитывает особенности и различия между состояниями одного

подмножества. Матричные характеристики подмножеств при этом могут оказаться также больших размеров. Поэтому разбиение множества состояний на несколько подмножеств (блочное укрупнение) может найти применение при моделировании сложных систем.

В статье [15] представлены алгоритмы проверки возможности укрупнения цепи Маркова и получения закона формирования укрупненной цепи. Предложена оценка количества возможных пространств, получаемых в процессе укрупнения состояний исходной цепи.

В работе [16] изложен метод укрупнения состояний системы, эволюционирование которой описывается марковским процессом как в дискретном, так и в непрерывном времени. В соответствии с этим методом система с данным множеством состояний приводится к множеству с меньшим числом состояний путем введения граничных состояний подмножеств. Переходы между состояниями на исходном множестве заменены на переходы между граничными состояниями. Модель позволяет оперировать с матрицами меньших размеров. Информация об исходном множестве состояний определенным образом упакована в систему с меньшим числом состояний с сохранением средней продолжительности нахождения в подмножестве состояний.

Рассмотрена идея об укрупнении состояний по функциональному признаку, т.е. по функциям, выполняемым системой в каждом состоянии [17].

Существенным фактором при укрупнении состояний является возможность сохранения точных значений характеристик процесса. В связи с этим предложено относить укрупнение состояний к одному из двух типов: точному (эквивалентному) или приближенному (квазиэквивалентному) [18]. В этой работе исследованы условия, при которых приближенные значения вероятностей укрупненных состояний стремятся к точным значениям. К сожалению, оценка погрешности при квазиэквивалентном укрупнении не произведена.

Такие, казалось бы, естественные способы уменьшения числа состояний, как произвольное объединение нескольких состояний в одно укрупненное, произвольное объединение нескольких элементов системы в один укрупненный элемент, сокращение числа состояний за счет отбрасывания маловероятных состояний, произвольное разбиение множества состояний на подмножества могут привести к значительной погрешности выходных характеристик системы. Эти подходы зачастую не имеют математического обоснования [19].

В работе [20] рассмотрен процесс Маркова в дискретном и в непрерывном времени, множество состояний которого разбито на укрупненные состояния, к каждому из которых приписана предельная вероятность. Достаточное условие укрупненности представлено как разновидность слабой укрупненности, при которой вероятности исходного процесса совпадают с вероятностями укрупненного процесса при определенных начальных условиях. Исследована зависимость свойств укрупненного процесса от начальных условий процесса. Показано, что расширение процесса Маркова также зависит от начальных условий процесса. Разработанная модель применима для биохимических реакций.

Целью настоящей работы является краткое изложение двух подходов к укрупнению состояний: метод приведения к входным состояниям подмножеств и укрупнение процесса на основе частот. Информация об исходном множестве состояний определенным образом упаковывается в процесс с меньшим числом состояний с сохранением определенных выходных характеристик процесса. Такое укрупнение состояний, по терминологии [18], можно назвать эквивалентным.

Постановка задачи укрупнения

Из приведенного обзора можно выделить разные подходы к проблеме укрупнения состояний. Эти подходы различаются по следующим признакам:

- по механизму уменьшения числа состояний: «склеивание» состояний, при котором несколько состояний заменяются на одно, отбрасывание маловероятных состояний, приведение подмножества состояний к входным состояниям этого подмножества, и иные подходы, при которых n состояний заменяются на m состояний, $m < n$;
- по совокупности сохраняемых выходных характеристик системы: сохраняются все выходные характеристики системы или сохраняется определенная совокупность этих характеристик;
- по точности сохраняемых характеристик: выходные характеристики укрупненной системы сохраняют точные значения или эти характеристики сохраняются приближенно; в последнем случае укрупнение может быть с оценкой погрешности или без нее;
- по возможности применения метода укрупнения при моделировании технических, организационных и других систем.

Позиция автора заключается в том, что уменьшение числа состояний не должно приводить к потере точности выходных характеристик системы. Если же вычисляются приближенные значения этих характеристик, то это обязательно должно сопровождаться оценкой погрешности. Поэтому предложения по укрупнению состояний, даже отличающиеся очевидностью и простотой, требуют оценки погрешности. Все это усложняет математическую модель.

С точки зрения охвата укрупнением множества состояний возможны следующие виды укрупнения:

1) простое укрупнение, когда множество состояний системы разбивается на два подмножества (в данной статье рассматривается такой вид укрупнения);

2) блочное укрупнение, когда множество состояний системы разбивается на несколько подмножеств (блоков);

3) многоуровневое укрупнение, когда укрупненное множество состояний укрупняется еще один или несколько раз, при этом число состояний укрупненного множества на каждом уровне имеет тенденцию к уменьшению.

Замечание. Если укрупняется множество состояний некоторой технической системы, то разбиение на подмножества целесообразно производить по логически обоснованному функциональному признаку, который имеет инженерно-технический смысл. Таким признаком может быть вид функционирования, профилактическое обслуживание, перепрограммирование, замена оборудования, проверка технического состояния, уровень эффективности и качества функционирования системы и др. В теории надежности, например, таким признаком зачастую является безотказность системы: множество состояний системы разбивается на подмножество работоспособных и подмножество неработоспособных состояний.

Два состояния исходного множества неразличимы по функциональному признаку, если функционирование системы в одном из них не отличается от функционирования в другом с точки зрения решаемой задачи. Два состояния являются различимыми, если с точки зрения решаемой задачи функционирование системы в одном из них отличается от функционирования в другом. Другими словами, значение выходного эффекта системы при нахождении ее в двух неразличимых состояниях одно и то же, а в различимых – разное.

Два неразличимых состояния исходного множества не могут быть произвольным образом объединены в одно состояние в силу того, что они характеризуются: разными причинами попадания в них; разными причинами выхода из них; разными временами нахождения в состояниях при однократном попадании. Произвольное объединение неразличимых состояний может привести к потере существенной информации об исходной системе [9].

С точки зрения различимости состояний можно выделить два крайних случая:

1) все состояния подмножества, выделенного по некоторому признаку, различимы. Тогда укрупнение состояний по функциональному признаку невозможно;

2) все состояния подмножества, выделенного по некоторому признаку, неразличимы. Тогда все состояния этого подмножества могут быть объединены в одно состояние при соответствующем математическом обосновании.

Замечания. 1. Функциональный признак различимости состояний может быть разным для разных постановок задач и для разных показателей надежности при анализе одной и той же системы. Ввиду этого в зависимости от постановки задачи могут быть сформированы разные классы неразличимых состояний.

2. Укрупнение состояний по функциональному признаку следует использовать совместно с другими методами.

Модель системы может быть представлена в дискретном или непрерывном времени. Соответственно, случайный процесс, моделирующий функционирование системы, протекает в дискретном или непрерывном времени. Принято, что этот процесс описывается однородной марковской цепью в дискретном времени или однородным марковским процессом в непрерывном времени. Предлагаемый подход основан на оперировании с матрицами [21–23]. Исходными характеристиками системы являются матрица переходных вероятностей $P = (p_{ij})$ для процесса в дискретном времени и матрица интенсивностей $\Lambda = (\lambda_{ij})$ для процесса в непрерывном времени, где p_{ij} – вероятность перехода из i -состояния в j -состояние на одном шаге; λ_{ij} – интенсивность перехода из i -состояния в j -состояние в непрерывном времени.

Современные средства компьютерной математики позволяют оперировать с большим числом состояний. Однако составление исходных данных может быть препятствием к формированию моде-

ли. Приведенные здесь подходы к укрупнению состояний разработаны для эргодического множества состояний на основе матричных методов моделирования однородных марковских процессов. Выходные характеристики моделируемой системы определяются в стационарном режиме.

Метод приведения к входным состояниям подмножеств

Метод рассмотрен на примере простого укрупнения, когда множество состояний системы разбивается на два подмножества. Изложение и обоснование метода приведено в работе [16]. Блочное укрупнение, когда множество состояний системы разбивается на несколько подмножеств, приведено в работе [22].

Рассматривается система, множество дискретных состояний которой W является эргодическим. По некоторому качественному (или функциональному) признаку множество W разбивается на два непересекающихся несущественных подмножества состояний U и V . С течением времени имеют место переходы как внутри подмножеств U и V , так и между ними. Задача укрупнения состоит в том, что каждое из подмножеств U и V заменяется другим подмножеством с меньшим числом состояний. При этом сохраняется такой важный показатель, как средняя продолжительность нахождения в исходном подмножестве состояний.

Заметим, что в каждой конкретной задаче UV -разбиение множества состояний имеет определенный инженерно-технический смысл. С течением времени система длительного использования переходит от состояния к состоянию как в каждом из подмножеств, так и из одного подмножества в другое. Тогда функционирование системы во времени можно разбить на циклы, заключающиеся в пребывании системы в подмножестве U и в следующем за ним пребывании в подмножестве V : $U \rightarrow V \rightarrow U \rightarrow V \rightarrow \dots$

Пребывание системы в подмножестве U и следующее за ним пребывание в подмножестве V будем называть UV -циклом системы, а пребывание системы в подмножестве V и следующее за ним нахождение в подмножестве U – VU -циклом. Таким образом, время функционирования системы длительного использования разбивается на циклы, состоящие из последовательных переходов из одного подмножества состояний в другое. Рассмотрим переходы между состояниями внутри каждого подмножества и между этими подмножествами. Эти процессы описываются с помощью подматриц матрицы переходных вероятностей P для процесса в дискретном времени и подматриц матрицы интенсивностей Λ для процесса в непрерывном времени. Исходные матрицы разбиваются на четыре подматрицы в соответствии с UV -разбиением множества W :

$$P = \begin{bmatrix} P_{UU} & P_{UV} \\ P_{VU} & P_{VV} \end{bmatrix}; \quad \Lambda = \begin{bmatrix} \Lambda_{UU} & \Lambda_{UV} \\ \Lambda_{VU} & \Lambda_{VV} \end{bmatrix}.$$

Переходы между состояниями внутри подмножеств описываются диагональными блоками матриц P и Λ : P_{UU} , P_{VV} , Λ_{UU} , Λ_{VV} , а переходы между подмножествами – блоками: P_{UV} , P_{VU} , Λ_{UV} , Λ_{VU} .

С помощью диагональных блоков матриц P и Λ можно получить характеристики продолжительности нахождения процесса в состояниях подмножеств и в самих подмножествах [4, 16, 23]. Эти характеристики приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики продолжительности нахождения в состояниях подмножеств и в подмножествах

Наименование	Для процесса	
	в дискретном времени	в непрерывном времени
1. Матрица средних продолжительностей состояний подмножества U	$N_U = \ n_U(i, j)\ = (E - P_{UU})^{-1}$	$T_U = \ t_U(i, j)\ = -\Lambda_{UU}^{-1}$
2. Матрица средних продолжительностей состояний подмножества V	$N_V = \ n_V(i, j)\ = (E - P_{VV})^{-1}$	$T_V = \ t_V(i, j)\ = -\Lambda_{VV}^{-1}$
3. Средняя продолжительность нахождения в подмножестве U	$n_U = \bar{r}_U N_U \bar{e}$	$t_U = \bar{r}_U T_U \bar{e}$
4. Средняя продолжительность нахождения в подмножестве V	$n_V = \bar{r}_V N_V \bar{e}$	$t_V = \bar{r}_V T_V \bar{e}$

В таблице обозначено: $n_U(i, j)$ [$n_V(i, j)$] – среднее число шагов нахождения в состоянии $u_j \in U$ [$v_j \in V$] до выхода из подмножества U [V] при условии, что состояние $u_i \in U$ [$v_i \in V$] является начальным при вождении в подмножество U [V]; $t_U(i, j)$ [$t_V(i, j)$] – среднее время нахождения в состоянии $u_j \in U$ [$v_j \in V$] до выхода из подмножества U [V] при условии, что состояние $u_i \in U$ [$v_i \in V$] является начальным при вождении в подмножество U [V]; $\bar{\pi}_U$ и $\bar{\pi}_V$ – распределения вероятностей начальных состояний подмножеств U и V соответственно; E – единичная матрица соответствующего порядка; $\dot{e}$ – столбец, все элементы которого равны 1.

Распределения $\bar{\pi}_U$ и $\bar{\pi}_V$ являются распределениями вероятностей начальных состояний при вхождении в подмножества U и V соответственно. Они представляют собой стохастические векторы.

Переходы между подмножествами U и V удобно описывать матрицами вероятностей возвращения в подмножества U и V , A_U и A_V соответственно. Эти матрицы приведены в табл. 2 для процессов в дискретном и непрерывном времени [21].

Таблица 2

Матрицы вероятностей возвращения в подмножества состояний

Наименование	Для процесса	
	в дискретном времени	в непрерывном времени
1. Матрица вероятностей возвращения в подмножество U	$A_U = \ a_U(i, j)\ =$ $= N_U P_{UV} N_V P_{VU}$	$A_U = \ a_U(i, j)\ =$ $= T_U \Lambda_{UV} T_V \Lambda_{VU}$
2. Матрица вероятностей возвращения в подмножество V	$A_V = \ a_V(i, j)\ =$ $= N_V P_{VU} N_U P_{UV}$	$A_V = \ a_V(i, j)\ =$ $= T_V \Lambda_{VU} T_U \Lambda_{UV}$

В таблице обозначено: $a_U(i, j)$ [$a_V(i, j)$] – вероятность того, что состояние $u_j \in U$ [$v_j \in V$] является начальным состоянием подмножества U [V] при условии, что на предыдущем цикле начальным было состояние $u_i \in U$ [$v_i \in V$].

Усечение матричных характеристик

Обозначим число состояний подмножеств U и V через m_U и m_V соответственно. Для систем с большим числом состояний эти числа могут достигать сотен и тысяч. При переходах между подмножествами состояний некоторые состояния можно исключить. Для выполнения этой операции следует ввести понятия входных и выходных состояний подмножеств [5, 7].

Состояние $u_i \in U$ является входным состоянием подмножества U , если оно может быть начальным состоянием подмножества U при переходе $V \rightarrow U$; состояние $v_i \in V$ является входным состоянием подмножества V , если оно может быть начальным состоянием подмножества V при переходе $U \rightarrow V$. Входные состояния подмножеств U и V образуют подмножества входных состояний этих подмножеств, U^+ и V^+ соответственно.

Состояние $u_j \in U$ является выходным состоянием подмножества U , если из него возможен непосредственный переход в подмножество V ; состояние $v_j \in V$ является выходным состоянием подмножества V , если из него возможен непосредственный переход в подмножество U . Выходные состояния подмножеств U и V образуют подмножества выходных состояний этих подмножеств, U^- и V^- соответственно.

Граничное состояние подмножества – это состояние, являющееся входным или выходным состоянием этого подмножества. Подмножество граничных состояний $U^{\#}$ образуется объединением подмножеств U^+ и U^- . Аналогично образуется подмножество $V^{\#}$.

При переходах между подмножествами U и V следует учитывать только граничные состояния. А именно, при переходе $U \rightarrow V$ выход из U возможен только из состояний подмножества U^- , а вход в подмножество V – только в состояния подмножества V^+ . Аналогично при переходе $V \rightarrow U$ выход из V возможен только из состояний подмножества V^- , а вход в подмножество U – только в состояния подмножества U^+ . Таким образом, переходы $U \rightarrow V \rightarrow U \rightarrow V \rightarrow \dots$ заменяются на переходы между граничными подмножествами. Иными словами, переходы между подмножествами U и V заменяют-

ся на переходы между подмножествами U^+ , U^- , V^+ и V^- . Число состояний граничных подмножеств обозначено через m_U^+ , m_U^- , m_V^+ , m_V^- .

Итак, исходные подмножества состояний заменены на четыре подмножества, число состояний которых не превосходит число состояний подмножеств U и V .

Поскольку переходы между подмножествами U и V заменяются на переходы между граничными подмножествами, то состояния, не являющиеся граничными, можно не учитывать при переходах между подмножествами U и V . Поэтому матричные характеристики исходных подмножеств U и V можно усекать. Усечение заключается в том, что удаляются строки и столбцы состояний, которые не являются граничными. Усеченные матричные характеристики приведены в табл. 3.

Таблица 3

Усеченные матричные характеристики подмножеств состояний

Характер усечения	Усеченная матрица		Размеры усеченной матрицы
	в дискретном времени	в непрерывном времени	
1. Усечение строк, относящихся к подмножеству U	N_U^+	T_U^+	$m_U^+ \times m_U$
2. Усечение строк, относящихся к подмножеству V	N_V^+	T_V^+	$m_V^+ \times m_V$
3. Усечение строк и столбцов, относящихся к подмножеству U	N_U^r	T_U^r	$m_U^+ \times m_U^-$
4. Усечение строк и столбцов, относящихся к подмножеству V	N_V^r	T_V^r	$m_V^+ \times m_V^-$
5. Усечение строк и столбцов подматрицы переходов $U \rightarrow V$	P_{UV}^r	Λ_{UV}^r	$m_U^- \times m_V^+$
6. Усечение строк и столбцов подматрицы переходов $V \rightarrow U$	P_{VU}^r	Λ_{VU}^r	$m_V^- \times m_U^+$
7. Усеченное распределение начальных вероятностей подмножества U	$\bar{r}_U^+$		$1 \times m_U^+$
8. Усеченное распределение начальных вероятностей подмножества V	$\bar{r}_V^+$		$1 \times m_V^+$

Усеченные матрицы N_U^+ и T_U^+ имеют строки, соответствующие состояниям $u_i \in U^+$, а остальные строки удалены; все столбцы сохранены. В усеченных матрицах N_U^r и T_U^r оставлены строки, соответствующие состояниям $u_i \in U^+$, а остальные строки удалены; кроме того, оставлены столбцы, соответствующие состояниям $u_j \in U^-$, а остальные столбцы удалены. Матрицы P_{UV}^r и Λ_{UV}^r являются результатом усечения исходных матриц P_{UV} и Λ_{UV} : в них оставлены строки, соответствующие состояниям $u_j \in U^-$, а остальные строки удалены; оставлены столбцы, соответствующие состояниям $v_j \in V^+$, а остальные столбцы удалены. В распределении начальных вероятностей состояний подмножества U , $\bar{r}_U^+$ оставлены элементы, соответствующие состояниям $u_i \in U^+$, а остальные элементы удалены.

Аналогично определяются усеченные матрицы N_V^+ , T_V^+ , N_V^r , T_V^r , P_{VU}^r , Λ_{VU}^r , $\bar{r}_V^+$.

Укрупненный процесс

Итак, переходы между подмножествами U и V заменяются на переходы между граничными подмножествами, а характеристики подмножеств состояний приводятся к входным состояниям этих подмножеств. Соответствующие формулы приведены в табл. 4.

В таблице обозначено: $b_{UV}^r(i,j)$ – вероятность того, что при переходе $U \rightarrow V$ система попадет в состояние $v_j \in V^+$ при условии, что состояние $u_i \in U^+$ является начальным на UV -цикле; $a_U^r(i,j)$ – вероятность того, что состояние $u_j \in U^+$ является начальным при переходе $V \rightarrow U$ при условии, что на предыдущем цикле начальным было состояние $u_i \in U^+$.

Таблица 4

Характеристики укрупненного процесса

Наименование характеристики	Обозначение и формула		Размеры матриц
	в дискретном времени	в непрерывном времени	
1. Матрицы вероятностей попаданий между подмножествами $U \rightarrow V$	$B_{UV}^r = \ b_{UV}^r(i, j)\ =$ $= N_U^r \cdot P_{UV}^r$	$= T_U^r \cdot \Lambda_{UV}^r$	$m_U^+ \times m_V^+$
2. Матрицы вероятностей попаданий между подмножествами $V \rightarrow U$	$B_{VU}^r = \ b_{VU}^r(i, j)\ =$ $= N_V^r \cdot P_{VU}^r$	$= T_V^r \cdot \Lambda_{VU}^r$	$m_V^+ \times m_U^+$
3. Матрица вероятностей возвращения в подмножество U	$A_U^r = \ a_U^r(i, j)\ = B_{UV}^r \cdot B_{VU}^r$		$m_U^+ \times m_U^+$
4. Матрица вероятностей возвращения в подмножество V	$A_V^r = \ a_V^r(i, j)\ = B_{VU}^r \cdot B_{UV}^r$		$m_V^+ \times m_V^+$
5. Строка средней продолжительности состояний подмножества U	$\bar{n}_U = \bar{r}_U^+ \cdot N_U^+$	$\bar{t}_U = \bar{r}_U^+ \cdot T_U^+$	$1 \times m_U$
6. Строка средней продолжительности состояний подмножества V	$\bar{n}_V = \bar{r}_V^+ \cdot N_V^+$	$\bar{t}_V = \bar{r}_V^+ \cdot T_V^+$	$1 \times m_V$
7. Средняя продолжительность нахождения в подмножестве U	$n_U = \bar{n}_U \cdot \dot{e}$	$t_U = \bar{t}_U \cdot \dot{e}$	
8. Средняя продолжительность нахождения в подмножестве V	$n_V = \bar{n}_V \cdot \dot{e}$	$t_V = \bar{t}_V \cdot \dot{e}$	

Аналогично определяются элементы матриц $b_{VU}^r(i, j)$ и $a_V^r(i, j)$.

Переход $U^+ \rightarrow V^+$ описывается матрицей вероятностей попаданий B_{UV}^r , которая вычисляется с помощью соответствующих усеченных матричных характеристик. Размеры матрицы B_{UV}^r не превосходят размеры матрицы B_{UV} , вычисленной по исходным матричным характеристикам (см. табл. 2). Возвращение в подмножество U описывается матрицей вероятностей возвращения A_U^r , порядок которой не превосходит порядка матрицы A_U , вычисленной по исходным матричным характеристикам (см. табл. 2).

Характеристики продолжительности нахождения в состояниях вычисляются с помощью усеченных распределений начальных вероятностей подмножеств U и V , $\bar{r}_U^+$ и $\bar{r}_V^+$. Вычисление этих распределений здесь не рассматривается. Следует отметить, что эти распределения вычисляются соответственно по матрицам A_U^r и A_V^r , порядок которых не превосходит порядка матриц A_U и A_V . Алгоритм вычисления усеченных распределений $\bar{r}_U^+$ и $\bar{r}_V^+$ в переходном и стационарном режимах при функционировании систем длительного использования такой же, как и для вычисления распределений $\bar{r}_U$ и $\bar{r}_V$, рассмотренных в работах [16, 21, 23].

При нахождении распределений $\bar{r}_U^+$ и $\bar{r}_V^+$ полезно принимать во внимание следующие обстоятельства:

1. Если матрица A_U^r (A_V^r) имеет равные строки, то эти строки и являются предельным распределением $\bar{r}_U^+$ ($\bar{r}_V^+$).
2. Если $\bar{r}_U^+$ ($\bar{r}_V^+$) является предельным распределением при возвращении в подмножество U^+ (V^+), то распределение $\bar{r}_V^+ = \bar{r}_U^+ \cdot B_{UV}^r$ ($\bar{r}_U^+ = \bar{r}_V^+ \cdot B_{VU}^r$) является предельным при возвращении в подмножество V^+ (U^+).
3. Если входным состоянием подмножества U (V) является одно единственное состояние, то усечение матрицы N_U^+ и T_U^+ (N_V^+ и T_V^+) представляет собой одну строку, соответствующую этому входному состоянию. При этом матрица вероятностей возвращения состоит из одного элемента: $A_U^r = (1)$ ($A_V^r = (1)$).

При реализации алгоритма укрупнения следует выделить граничные состояния (входные и выходные) подмножеств U и V и определить соответствующие числа граничных состояний. Эту операцию можно выполнить по графу состояний с учетом переходов $U \rightarrow V$ и $V \rightarrow U$ или по исходным матрицам. Затем следует найти усеченные матричные характеристики, приведенные в табл. 3.

Изложенный метод укрупнения можно рассматривать так же, как приведение подмножеств U и V к двум эквивалентным состояниям u и v соответственно. Матричные характеристики подмножеств U и V заменяются на соответствующие усеченные матричные характеристики, и в результате выполнения операций с этими характеристиками получают среднюю продолжительность эквивалентных состояний.

Частоты переходов между состояниями исходного процесса и между состояниями подмножеств

Для процессов в дискретном и непрерывном времени вводится понятие частоты ω_{ij} непосредственных переходов между двумя состояниями исходного процесса. Для процесса в дискретном времени ω_{ij} – это среднее число непосредственных переходов $s_i \rightarrow s_j$, приходящееся на один шаг, а для процесса в непрерывном времени ω_{ij} – это среднее число переходов $s_i \rightarrow s_j$, приходящееся на единицу времени. Эти частоты удобно выразить в виде матрицы частот для исходного процесса в дискретном и непрерывном времени $\Omega = \|\omega_{ij}\|$ [14]:

$$а) \Omega = \Pi_{dg} \cdot (P - E); б) \Omega = \Pi_{dg} \cdot \Lambda, \quad (1)$$

где Π_{dg} – диагональная матрица предельных вероятностей состояний; E – единичная матрица соответствующего порядка.

Итак, соотношения (1) связывают три матричные характеристики исходного множества состояний: частоты переходов между состояниями, предельные вероятности состояний и исходные характеристики случайного процесса (переходные вероятности и интенсивности переходов).

В работе [24] введено понятие средней частоты состояния s_i , ω_i , которая одновременно является частотой входа в это состояние и частотой выхода из этого состояния.

Средняя частота ω_i связана с диагональным элементом ω_{ii} матрицы Ω простым соотношением: $\omega_i = -\omega_{ii}$.

Элементы матрицы Ω могут быть вычислены другими методами, а именно, на основе определителей или с помощью обращения матриц [8].

Из баланса частот относительно каждого состояния следуют свойства матрицы частот для процесса в дискретном и непрерывном времени:

$$а) \bar{e} \cdot \Omega = \bar{0}; б) |\Omega| = 0, \quad (2)$$

где $\bar{e}$ – строка, каждый элемент которой равен 1. Эти свойства можно использовать при различных реализациях исходного процесса, а также контроля правильности вычисления матрицы частот.

Матрица частот Ω может быть разбита на четыре подматрицы в соответствии с разбиением множества состояний W на подмножества U и V :

$$\Omega = \begin{pmatrix} \Omega_{UU} & \Omega_{UV} \\ \Omega_{VU} & \Omega_{VV} \end{pmatrix},$$

где Ω_{UU} , Ω_{VV} , Ω_{UV} , Ω_{VU} – подматрицы частот переходов внутри подмножеств U и V и между ними.

Представим матрицы Ω и Π_{dg} , а также исходные матрицы в виде четырех подматриц в соответствии с разбиением множества W на подмножества U и V . Произведем умножение (1) с использованием блочных матриц [5,13]. Тогда получим для процесса в дискретном времени

$$\begin{pmatrix} \Omega_{UU} & \Omega_{UV} \\ \Omega_{VU} & \Omega_{VV} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Pi_{dgU} \cdot (P_{UU} - E) & \Pi_{dgU} \cdot P_{UV} \\ \Pi_{dgV} \cdot P_{VU} & \Pi_{dgV} \cdot (P_{VV} - E) \end{pmatrix} \quad (3)$$

и для процесса в непрерывном времени:

$$\begin{pmatrix} \Omega_{UU} & \Omega_{UV} \\ \Omega_{VU} & \Omega_{VV} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Pi_{dgU} \cdot \Lambda_{UU} & \Pi_{dgU} \cdot \Lambda_{UV} \\ \Pi_{dgV} \cdot \Lambda_{VU} & \Pi_{dgV} \cdot \Lambda_{VV} \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где Π_{dgU} и Π_{dgV} – диагональные матрицы, полученные из матрицы Π_{dg} путем удаления из нее строк и столбцов, соответствующих подмножествам V и U соответственно; E – единичная матрица согласованного порядка.

Частоты переходов между подмножествами состояний

Частоты переходов ω_{ij} ($i \neq j$) являются суммируемыми характеристиками, т.е. можно суммировать частоты любых переходов. Тогда средняя частота ω_{UV} переходов $U \rightarrow V$ между двумя подмножествами определяется суммой частот этих переходов между состояниями, т.е.

$$\omega_{UV} = \sum_{u_i} \sum_{v_j} \omega_{ij}, \quad (5)$$

где $u_i \in U$; $v_j \in V$. Аналогично находится средняя частота ω_{VU} переходов $V \rightarrow U$:

$$\omega_{VU} = \sum_{v_i} \sum_{u_j} \omega_{ij}. \quad (6)$$

Как и ранее, эти частоты имеют смысл среднего числа переходов между подмножествами состояний, приходящегося на один шаг в дискретном времени или в единицу времени в непрерывном времени.

В работах [14, 21] доказано, что $\omega_{UV} = \omega_{VU}$ для эргодического процесса.

Полученный результат легко интерпретируется: частота переходов $U \rightarrow V$ равна частоте обратных переходов, так как после каждого вхождения в подмножество U следует вхождение в подмножество V , и наоборот. Этот результат можно рассматривать так же, как частотное равновесие или частотный баланс: в стационарном режиме частота переходов из одного подмножества в другое равна частоте обратного перехода. Это положение справедливо для любого разбиения множества состояний системы на два подмножества.

Характеристики подмножеств состояний

Частота ω_{UV} является частотой цикла, представляющего собой пребывание системы в подмножестве U и следующее за ним пребывание в подмножестве V . Средняя продолжительность цикла обозначена через n_{UV} для процесса в дискретном времени и через t_{UV} для процесса в непрерывном времени:

$$n_{UV} = n_U + n_V; t_{UV} = t_U + t_V, \quad (7)$$

где n_U и n_V – средняя продолжительность нахождения в подмножествах U и V в числе шагов; t_U и t_V – средняя продолжительность нахождения в подмножествах U и V в единицах непрерывного времени.

Очевидно, что $\omega_{UV} = 1/n_{UV}$ для процесса в дискретном времени и $\omega_{UV} = 1/t_{UV}$ для процесса в непрерывном времени. Отсюда следуют зависимости между предельными вероятностями подмножеств состояний, продолжительностями нахождения в подмножествах состояний и частотой цикла (табл. 5).

Таблица 5

Соотношения между предельными вероятностями подмножеств, продолжительностями нахождения в подмножествах состояний в стационарном режиме и частотой цикла

Соотношения для процесса	
в дискретном времени	в непрерывном времени
$\pi_U = n_U \cdot \omega_{UV}$	$\pi_U = t_U \cdot \omega_{UV}$
$\pi_V = n_V \cdot \omega_{UV}$	$\pi_V = t_V \cdot \omega_{UV}$

В таблице обозначено: $\pi_U = \bar{\pi}_U \cdot \dot{e}$ и $\pi_V = \bar{\pi}_V \cdot \dot{e}$ – предельные вероятности нахождения соответственно в подмножествах U и V в стационарном режиме.

Характеристики подмножеств U и V в стационарном режиме приведены в табл. 6.

Таблица 6

Вероятностные, частотные и временные характеристики подмножеств состояний

Характеристики подмножеств	Обозначения или формулы для вычисления
1. Предельные вероятности подмножеств	$\pi_U; \pi_V$
2. Средняя частота переходов $U \rightarrow V$ или $V \rightarrow U$	$\omega_{UV} = \omega_{VU}$
3. Средняя продолжительность цикла для процесса в дискретном времени	$n_{UV} = n_U + n_V = 1 / \omega_{UV}$
4. Среднее число шагов нахождения в подмножестве U	$n_U = \pi_U \cdot n_{UV} = \pi_U / \omega_{UV}$
5. Среднее число шагов нахождения в подмножестве V	$n_V = \pi_V \cdot n_{UV} = \pi_V / \omega_{UV}$
6. Средняя продолжительность цикла для процесса в непрерывном времени	$t_{UV} = t_U + t_V = 1 / \omega_{UV}$
7. Среднее время нахождения в подмножестве U	$t_U = \pi_U \cdot t_{UV} = \pi_U / \omega_{UV}$
8. Среднее время нахождения в подмножестве V	$t_V = \pi_V \cdot t_{UV} = \pi_V / \omega_{UV}$

Показатели укрупнимости

Эффект от уменьшения числа состояний можно оценить коэффициентом укрупнимости, который представляет собой число «исчезнувших» или «упакованных» состояний при замене исходного процесса на укрупненный, приходящееся на одно укрупненное состояние:

$$L = (m - M) / M, \quad (8)$$

где m – число состояний исходного процесса; M – число состояний укрупненного процесса.

Число «исчезнувших» состояний – это разность между числом состояний исходного процесса и числом состояний укрупненного процесса. Чем больше эта разность, тем выше эффект от укрупнения. При приведении числа «исчезнувших» состояний к одному укрупненному состоянию можно использовать коэффициент укрупнимости для сравнения эффекта от укрупнения для разных вариантов укрупнения одного процесса и для сравнения эффекта от укрупнения для разных случайных процессов.

Коэффициент укрупнимости может быть применен для одного подмножества состояний:

$$L_U = \frac{m_U - m_U^+}{m_U^+}, \quad (9)$$

где m_U – число состояний подмножества U ; m_U^+ – число входных состояний подмножества U .

Коэффициент укрупнимости является удобным показателем для практического применения, поскольку он характеризует эффект укрупнения, а именно: коэффициент укрупнимости возрастает с увеличением числа «упакованных» состояний. Следует иметь в виду, что при отсутствии укрупнения коэффициент укрупнимости равен нулю.

Приведем два простых иллюстративных примера с небольшим числом состояний.

Пример укрупнения на основе однородного процесса в дискретном времени

В работе [25] исследована модель управления перегрузками при передаче информации от одного отправителя к нескольким получателям. Модель описывается пятью состояниями: 1 – стабилизация скорости, вызванная стабилизацией фрагментации буфера приема; 2 – понижение скорости передачи данных в связи с возможными проблемами в буфере приема; 3 – повышение скорости, вызванное освобождением места в буфере приемника; 4 – сброс скорости на 40 % в связи с отсутствием свободного места в буфере приема или в связи с высокой фрагментацией буфера приема; 5 – резкий сброс скорости (на 60 %) в связи с отсутствием свободного места в буфере приема или в связи с высокой фрагментацией буфера приема; состояние 5 является аварийным.

Матрица переходных вероятностей, сформированная по экспериментальным данным за 5338 шагов, имеет вид

$$P = \begin{pmatrix} 0,214 & 0,186 & 0,425 & 0,175 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0,013 & 0,002 & 0,976 & 0,008 & 0,001 \\ 0,510 & 0 & 0 & 0,289 & 0,200 \\ 0,615 & 0 & 0 & 0 & 0,385 \end{pmatrix}.$$

Будем называть циклом нахождение системы в подмножестве $U = \{1, 2, 3, 4\}$ и следующее за ним нахождение в подмножестве $V = \{5\}$. Предельная вероятность аварийного состояния $\pi_5 = 0,007$. Частота аварийного состояния, или частота цикла $\omega_{UV} = \pi_5 \cdot p_{51} = 4,383 \cdot 10^{-3}$. Другие характеристики:

- средняя продолжительность цикла: $n_{UV} = 1/\omega_{UV} = 228,172$ шагов;
- средняя продолжительность аварийного состояния после попадания в него:

$$n_V = (1 - p_{55})^{-1} = 1,625.$$

- средняя продолжительность нахождения в состояниях подмножества U :

$$n_U = n_{UV} - n_V = 226,547.$$

Таким образом, модель системы с пятью состояниями сведена к системе с двумя состояниями, что позволило вычислить среднее время между попаданиями в аварийное состояние, предельную вероятность аварийного состояния, среднюю продолжительность нахождения в состояниях 1,2,3,4.

Примечание. В работе [25] временные характеристики, связанные с аварийным состоянием, переведены в единицы времени.

Коэффициент укрупнённости данной системы $L = (5 - 2)/2 = 1,5$.

Пример укрупнения на основе однородного процесса в непрерывном времени

Простой иллюстративный пример с небольшим числом состояний приведен на основе модели функционирования линии связи в условиях недостоверного контроля технического состояния [26]. В модель заложены пять пронумерованных состояний: 1 – работоспособное состояние линии связи; 2 – неработоспособное состояние линии связи; 3 – проверка линии связи, находящейся в работоспособном состоянии; 4 – проверка линии связи, находящейся в неработоспособном состоянии; 5 – восстановление линии связи.

Процесс протекает в непрерывном времени. Особенность рассматриваемой модели заключается в том, что время нахождения в каждом состоянии отсчитывается от момента попадания в это состояние.

Матрица интенсивностей имеет вид

$$\Lambda = \begin{pmatrix} -\lambda - \gamma & \lambda & \gamma & 0 & 0 \\ 0 & -\gamma & 0 & \gamma & 0 \\ (1 - \alpha) \cdot \mu_{\pi} & 0 & -\mu_{\pi} & 0 & \alpha \cdot \mu_{\pi} \\ 0 & \beta \cdot \mu_{\pi} & 0 & -\mu_{\pi} & (1 - \beta) \cdot \mu_{\pi} \\ \mu_{\nu} & 0 & 0 & 0 & -\mu_{\nu} \end{pmatrix}.$$

В матрице обозначено: λ – интенсивность отказов линии связи; γ – интенсивность начала периодической проверки со случайным периодом; μ_{π} – интенсивность завершения периодической проверки; α – вероятность ошибки контроля I рода; β – вероятность ошибки контроля II рода; μ_{ν} – интенсивность завершения восстановления.

Граф состояний может быть легко восстановлен по приведенной матрице интенсивностей.

Пример приведен в числах, поскольку формулы являются громоздкими. Исходные данные взяты такие же, как в работе [26], а именно: средняя наработка на отказ – 10 000 ч, среднее время между проверками – 72 с, среднее время восстановления – 2 ч, средняя продолжительность одной проверки – 1 с. Исходя из этих значений приняты следующие значения интенсивностей событий, приведенных к единице измерения ч^{-1} :

- интенсивность отказов $\lambda = 10^{-4}$;
- интенсивность начала проверки $\gamma = 50$;
- интенсивность завершения проверки $\mu_{\pi} = 3\,600$;
- интенсивность завершения восстановления $\mu_{\nu} = 0,5$;
- вероятность ошибки контроля I рода $\alpha = 0,001$;
- вероятность ошибки контроля II рода $\beta = 0,001$.

Строка предельных вероятностей, вычисленных по формулам на основе определителя или на основе обращения матриц [23]:

$$\bar{\pi} = (0,898 \quad 1,797 \cdot 10^{-6} \quad 0,012 \quad 2,496 \cdot 10^{-8} \quad 0,09).$$

Матрица частот, вычисленная по формуле (1), имеет вид

$$\Omega = \begin{bmatrix} -44,88 & 8,976 \cdot 10^{-5} & 44,88 & 0 & 0 \\ 0 & -8,985 \cdot 10^{-5} & 0 & 8,985 \cdot 10^{-5} & 0 \\ 44,835 & 0 & -44,88 & 0 & 0,045 \\ 0 & 8,985 \cdot 10^{-8} & 0 & -8,985 \cdot 10^{-5} & 8,976 \cdot 10^{-5} \\ 0,045 & 0 & 0 & 0 & -0,045 \end{bmatrix}.$$

Свойства (2) матрицы частот выполняются (в данном примере это можно проверить также и визуально).

Разбиение множества состояний по функциональному признаку на два подмножества: $U = \{1, 2, 3, 4\}$; $V = \{5\}$. В соответствии с этим матрица частот разбивается на четыре подматрицы:

$$\Omega_{UU} = \begin{bmatrix} -44,88 & 8,976 \cdot 10^{-5} & 44,88 & 0 \\ 0 & -8,985 \cdot 10^{-5} & 0 & 8,985 \cdot 10^{-5} \\ 44,835 & 0 & -44,88 & 0 \\ 0 & 8,985 \cdot 10^{-8} & 0 & -8,985 \cdot 10^{-5} \end{bmatrix};$$

$$\Omega_{UV} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0,045 \\ 8,976 \cdot 10^{-5} \end{pmatrix}; \Omega_{VU} = (0,045 \ 0 \ 0 \ 0); \Omega_{VV} = (-0,045).$$

Частоты переходов между подмножествами U и V , вычисленные по формулам (5) и (6):

$$\omega_{UV} = -\bar{e} \cdot \Omega_{12} \cdot \dot{e} = 0,045; \omega_{VU} = -\bar{e} \cdot \Omega_{21} \cdot \dot{e} = 0,045.$$

Частоты подмножеств U и V :

$$\omega_U = -\bar{e} \cdot \Omega_{11} \cdot \dot{e} = 0,045; \omega_V = -\bar{e} \cdot \Omega_{22} \cdot \dot{e} = 0,045.$$

Матрица частот укрупненного множества:

$$\Omega_{\text{укр}} = \begin{bmatrix} \omega_{UU} & \omega_{UV} \\ \omega_{VU} & \omega_{VV} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,045 & 0,045 \\ 0,045 & -0,045 \end{bmatrix}.$$

Видно, что свойство баланса частот справедливо как для исходного множества, так и для укрупненного множества состояний. Так, частота перехода $V \rightarrow U$, вычисленная непосредственно по предельной вероятности состояния и интенсивности перехода:

$$\omega_{VU} = \pi_5 \cdot \lambda_{51} = 0,09 \cdot 0,5 = 0,045.$$

Полученные результаты полностью согласуются с результатами модели [4], основанной на использовании теории полумарковских процессов. По этим результатам можно вычислить среднее время цикла, коэффициенты готовности и неготовности, средние времена нахождения в работоспособном и неработоспособном состояниях, приходящиеся на один цикл.

Коэффициент укрупнимости, как и в предыдущем примере, $L = (5-2)/2 = 1,5$.

Заключение

Рассмотренные методы укрупнения позволяют привести систему, состояния которой разбиты на два или несколько подмножеств, к системе с меньшим числом состояний. Особенность этих методов заключается в том, что сохраняются значения определенных характеристик. Так, в методе укрупнения путем приведения к входным состояниям подмножеств сохраняются средние продолжительности нахождения в состояниях и предельные вероятности состояний, а в методе укрупнения на основе частот сохраняются средние частоты состояний и частоты переходов между состояниями как для процесса в дискретном времени, так и для процесса в непрерывном времени. На основе этих

характеристик могут быть вычислены другие характеристики системы, в том числе необходимые показатели надежности.

Полученные зависимости между характеристиками исходного и укрупненного случайного процесса можно использовать при исследовании различных процессов, моделирующих в стационарном режиме функционирования систем различного назначения (технических, экономических, организационных). В частности, по известным (заданным) характеристикам могут быть вычислены другие характеристики и параметры случайных процессов. Например, заданными могут быть переходные вероятности для процесса в дискретном времени или интенсивности переходов в непрерывном времени, частоты состояний и частоты переходов между состояниями как исходного, так и укрупненного процесса, оценки которых получены путем сбора и обработки информации о случайном процессе. Также в качестве исходных характеристик могут быть использованы продолжительности нахождения в состояниях и в подмножествах состояний, предельные вероятности состояний и подмножеств состояний и т.д.

Характеристики системы находятся путем оперирования с матрицами. При разбиении множества состояний на подмножества происходит переход к блочным матрицам, а при замене подмножеств состояний состояниями укрупненного процесса – к матрицам меньшего размера по сравнению с исходными. Эффект от укрупнения заключается в том, что уменьшаются размеры матричных характеристик, описывающих переходы между состояниями укрупненной системы. Таким образом, для нахождения характеристик, связанных с подмножеством состояний, не нужно использовать полные матрицы исходных характеристик, можно оперировать с подматрицами, относящимися к этому подмножеству. В некоторых случаях это может существенно упростить решение конкретных задач. Алгоритм укрупнения на основе оперирования с матрицами может быть реализован с помощью таких инструментов, как Mathcad или Matlab. Операции могут быть выполнены в числовом или аналитическом виде.

При моделировании систем могут быть разные цели, разные исходные данные и разные выходные характеристики. На основе полученных соотношений между параметрами исходного и укрупненного процесса могут быть найдены характеристики, описывающие функционирование моделируемой системы на укрупненном множестве состояний. Например, при исследовании надежности систем могут быть найдены коэффициент готовности, среднее время безотказной работы и другие показатели надежности системы в стационарном режиме.

Разработанные методы укрупнения могут быть использованы в инженерной практике. Материал настоящей статьи позволяет составить модель с целью исследования случайного процесса или вероятностной системы на этапе проектирования или совершенствования их эксплуатационных свойств, например, с целью улучшения их эффективности и надежности.

Использование метода приведения к входным состояниям и частотного метода позволяет уменьшить размеры матричных характеристик, т.е. позволяет укрупнить процесс.

Список литературы

1. Захаров В. К., Сарманов О. В. Укрупнение состояний цепи Маркова и стационарное изменение спектра // Докл. АН СССР. Физика, математика. 1965. Вып. 160, № 4. С. 762–764.
2. Королюк В. С., Турбин А. Ф. Фазовое укрупнение сложных систем. Киев : Вища школа, 1978. 112 с.
3. Смирнов И. М. Приближенное укрупнение состояний марковской цепи со слабыми связями // Автоматика и телемеханика. 1988. Вып. 1. С. 77–83.
4. Кемени Д., Снелл Д. Конечные цепи Маркова. М. : Наука, 1970. 272 с.
5. Клемин А. И., Емельянов В. С., Морозов В. Е. Расчет надежности ядерных энергетических установок. М. : Энергоиздат, 1982. 208 с.
6. Каштанов В. А., Медведев А. И. Теория надежности сложных систем. М. : Физматлит, 2010. 608 с.
7. Зеленцов Б. П. Укрупнение состояний при расчете надежности систем // Надежность и контроль качества. 1988. № 8. С. 22–27.
8. Shalizi R. C. Methods and Techniques of Complex System: An overview. Publisher arXiv 2006. 96 p.
9. Rusconi S., Akhmatskaya E., Sokolovski D. [et al.]. Relative Frequencies of Constrained Events in Stochastic Processes: An analytic approach // Physical Review E 92. 2015.
10. Kumar A. Discrete Event Stochastic Processes. Lecture Notes for Engineering Curriculum. 2012. 166 p.
11. Salfner F. Modeling Event-driven Time Series with Generalized Hidden Semi-Markov Models. Technical Report 208, Humboldt University, 2006.
12. Gambin A., Pokarowski P. A New Combinatorial Algorithm for Large Markov Chains // Computer Algebra in Scientific Computing CASC 2001. Springer, 2001. P. 195–212.

13. Gambin A., Pokarowski P. Aggregation Algorithms for Markov Chains with Large State Space. Institute of Informatics, Institute of Applied Mathematics, Warsaw University, Poland, 2001. 49 p.
14. Зеленцов Б. П. Частотный метод моделирования вероятностных систем длительного использования // Вестник СибГУТИ. 2016. № 4. С. 25–38.
15. Захаров В. М., Эминов Б. Ф. Алгоритмы укрупнения цепей Маркова // Вестник Казанского государственного технического университета им. А. Н. Туполева. 2013. № 2. С. 125–133.
16. Зеленцов Б. П. Укрупнение состояний сложных систем, моделируемых марковскими процессами // Вестник СибГУТИ. 2017. № 3. С. 43–56.
17. Зеленцов Б. П. Укрупнение состояний по функциональному признаку при расчете надежности оборудования систем коммутации // Анализ и моделирование сигналов и систем связи : сб. науч. тр. учеб. заведений связи. СПб., 1993. Вып. 157. С. 74–79.
18. Черкасов А. В. Принцип квазиэквивалентности укрупнения состояний марковских моделей // Молодой ученый. 2016. № 11. С. 529–535.
19. Ярыгин Г. А. Расчет надежности систем с большим числом состояний // Надежность и контроль качества. 1979. № 2.
20. Ganguly A., Petrov T., Koepl H. Markov Chain Aggregation and its Applications to Combinatorial Reaction Networks // arXiv: 1303.4532v2. 2013. 29 p.
21. Зеленцов Б. П. Матричные методы моделирования однородных марковских процессов. Palmarium Academic Publishing, 2017. 133 с.
22. Зеленцов Б. П. Матричные модели надежности систем. Инженерные методы расчета. Новосибирск : Наука, 1991. 112 с.
23. Зеленцов Б. П. Матричные модели функционирования оборудования систем связи // Вестник СибГУТИ. 2015. № 4. С. 62–73.
24. Зеленцов Б. П. Укрупнение состояний марковских процессов на основе частот // Вестник СибГУТИ. 2018. № 2. С. 8–21.
25. Бахарев А. В., Зеленцов Б. П., Максимов В. П., Шувалов В. П. Управление перегрузками при передаче информации от одного отправителя нескольким получателям // Вестник СибГУТИ. 2018. № 1. С. 22–32.
26. Зеленцов Б. П., Максимов В. П., Шувалов В. П. Модель функционирования линии связи в условиях недо-
стоверного контроля технического состояния // Вестник СибГУТИ. 2015. № 3. С. 35–43.

References

1. Zakharov V.K., Sarmanov O.V. Enlargement of the states of the Markov chain and stationary change of the spectrum. *Dokl. AN SSSR. Fizika, matematika = Reports of the USSR Academy of Sciences. Physics, Mathematics*. 1965;160(4):762–764. (In Russ.)
2. Korolyuk V.S., Turbin A.F. *Fazovoe ukрупnenie slozhnykh sistem = Phase consolidation of complex systems*. Kiev: Vishcha shkola, 1978:112.
3. Smirnov I.M. Approximate enlargement of Markov chain states with weak connections. *Avtomatika i telemekhanika = Automation and telemekhanics*. 1988;(1):77–83. (In Russ.)
4. Kemeni D., Snell D. *Konechnye tsepi Markova = Finite Markov chains*. Moscow: Nauka, 1970:272. (In Russ.)
5. Klemin A.I., Emel'yanov V.S., Morozov V.E. *Raschet nadezhnosti yadernykh energeticheskikh ustanovok = Calculation of the reliability of nuclear power plants*. Moscow: Energoizdat, 1982:208. (In Russ.)
6. Kashtanov V.A., Medvedev A.I. *Teoriya nadezhnosti slozhnykh sistem = Theory of reliability of complex systems*. Moscow: Fizmatlit, 2010:608. (In Russ.)
7. Zelentsov B.P. Consolidation of states when calculating the reliability of systems. *Nadezhnost' i kontrol' kachestva = Reliability and quality control*. 1988;(8):22–27. (In Russ.)
8. Shalizi R.C. *Methods and Techniques of Complex System: An overview*. Publisher arXiv 2006:96.
9. Rusconi S., Akhmatskaya E., Sokolovski D. [et al.]. Relative Frequencies of Constrained Events in Stochastic Processes: An analytic approach. *Physical Review E* 92. 2015.
10. Kumar A. *Discrete Event Stochastic Processes. Lecture Notes for Engineering Curriculum*. 2012:166.
11. Salfner F. *Modeling Event-driven Time Series with Generalized Hidden Semi-Markov Models. Technical Report 208, Humboldt University*, 2006.
12. Gambin A., Pokarowski P. A New Combinatorial Algorithm for Large Markov Chains. *Computer Algebra in Scientific Computing CASC 2001*. Springer, 2001:195–212.
13. Gambin A., Pokarowski P. *Aggregation Algorithms for Markov Chains with Large State Space. Institute of Informatics, Institute of Applied Mathematics, Warsaw University, Poland*, 2001. 49 p.
14. Zelentsov B.P. Frequency method of modeling probabilistic systems of long-term use. *Vestnik SibGUTI = SibGUTI Bulletin*. 2016;(4):25–38. (In Russ.)
15. Zakharov V.M., Eminov B.F. Markov chain aggregation algorithms. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. A.N. Tupoleva = Bulletin of the Kazan State Technical University named after A.N. Tupolev*. 2013;(2):125–133. (In Russ.)

16. Zelentsov B.P. Consolidation of states of complex systems modeled by Markov processes. *Vestnik SibGUTI = SibGUTI Bulletin*. 2017;(3):43–56. (In Russ.)
17. Zelentsov B.P. Aggregation of states by functional attribute when calculating the reliability of switching systems equipment. *Analiz i modelirovanie signalov i sistem svyazi: sb. nauch. tr. ucheb. zavedeniy svyazi = Analysis and modeling of signals and communication systems: collection of scientific works of educational institutions of communication*. Saint-Petersburg, 1993;(157):74–79. (In Russ.)
18. Cherkasov A.V. The principle of quasi-equivalence of the enlargement of states of Markov models. *Molodoy uchenyy = Young scientist*. 2016;(11):529–535. (In Russ.)
19. Yarygin G.A. Calculation of reliability of systems with a large number of states. *Nadezhnost' i kontrol' kachestva = Reliability and quality control*. 1979;(2). (In Russ.)
20. Ganguly A., Petrov T., Koepl H. *Markov Chain Aggregation and its Applications to Combinatorial Reaction Networks*. arXiv: 1303.4532v2. 2013. 29 p.
21. Zelentsov B.P. *Matrichnye metody modelirovaniya odnorodnykh markovskikh protsessov = Matrix methods for modeling homogeneous Markov processes*. Palmarium Academic Publishing, 2017:133. (In Russ.)
22. Zelentsov B.P. *Matrichnye modeli nadezhnosti sistem. Inzhenernye metody rascheta = Matrix models of system reliability. Engineering calculation methods*. Novosibirsk: Nauka, 1991:112. (In Russ.)
23. Zelentsov B.P. Matrix models of the functioning of communication systems equipment. *Vestnik SibGUTI = SibGUTI Bulletin*. 2015;(4):62–73. (In Russ.)
24. Zelentsov B.P. Aggregation of states of Markov processes based on frequencies. *Vestnik SibGUTI = SibGUTI Bulletin*. 2018;(2):8–21. (In Russ.)
25. Bakharev A.V., Zelentsov B.P., Maksimov V.P., Shuvalov V.P. Congestion control when transferring information from one sender to several recipients. *Vestnik SibGUTI = SibGUTI Bulletin*. 2018;(1):22–32. (In Russ.)
26. Zelentsov B.P., Maksimov V.P., Shuvalov V.P. The model of the functioning of the communication line in the conditions of unreliable control of the technical condition. *Vestnik SibGUTI = SibGUTI Bulletin*. 2015;(3):35–43. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Борис Павлович Зеленцов

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры высшей математики,
Сибирский государственный университет
телекоммуникаций и информатики
(Россия, г. Новосибирск, ул. Кирова, 86)
E-mail: zelentsov@mail.ru

Boris P. Zelentsov

Doctor of technical sciences, professor,
professor of sub-department of higher mathematics,
Siberian State University of
Telecommunications and Information Sciences
(86 Kirov street, Novosibirsk, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 10.02.2021

Поступила после рецензирования/Revised 15.03.2021

Принята к публикации/Accepted 31.03.2021

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ

TECHNOLOGICAL BASIS FOR IMPROVING RELIABILITY AND PRODUCT QUALITY

УДК 621.382.049.77

doi:10.21685/2307-4205-2021-2-5

О ВОЗМОЖНОСТЯХ ВЫБОРА МЕТОДА ОЦЕНКИ ДРЕЙФОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛНОВЫХ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ГИРОСКОПОВ ГЕ 006 НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ПОДТВЕРЖДЕНИЯ

О. Н. Лузгина¹, С. А. Москалев², Н. В. Недопекин³,
А. С. Новоселов⁴, А. А. Папко⁵, А. В. Поспелов⁶

^{1, 2, 3, 4, 5, 6} Научно-исследовательский институт физических измерений, Пенза, Россия
^{1, 3, 6} inercial@niifi.ru, ² moskalev_sa@niifi.ru, ^{4, 5} info@niifi.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Опыт исследования и разработки волновых твердотельных гироскопов (ВТГ) в РФ в сравнении с аналогичным зарубежным опытом не отличается многообразием приемов, среди которых основное место занимает решение проблем механической балансировки резонаторов, зарекомендовавшей себя непроизводительной и непредсказуемой процедурой. Наряду с этим известным фактом является то, что современный ВТГ управляется четырьмя системами автоматического управления энергией колебаний, компенсации угловой скорости, квадратуры и фазы. Обобщенным критерием оценки требуемого качества работы указанных систем является достижение установленных значений дрейфовых характеристик ВТГ. Как правило, в технических заданиях на их разработку устанавливаются требуемые значения случайного блуждания нуля σ_{ARW} [$^{\circ}/\sqrt{ч}$] и стабильности нуля b [$^{\circ}/ч$] без привязки к методам оценки, несмотря на то, что σ_{ARW} и b входят только в номенклатуру параметров, оцениваемых по вариациям Аллана. *Материалы и методы.* Метод вариаций Аллана [1] признается его разработчиком альтернативой известным методам классического дисперсионного анализа, имеющим определенные ограничения при оценке дрейфов. Наряду с этим при выходе ВТГ ГЕ 006 на рынок пришлось столкнуться со скептическим отношением потребителя к методу Аллана без уточнения каких-либо веских причин подобного недоверия. *Результаты и выводы.* Приводится обоснование выбора метода оценки дрейфовых характеристик ВТГ ГЕ 006 на примерах всестороннего анализа выборок, полученных в длинных и коротких запусках с использованием двух моделей дрейфа – вариаций Аллана и классического дисперсионного анализа.

Ключевые слова: волновой твердотельный гироскоп, метод вариаций Аллана, нестационарный процесс, шумы, спектры, случайное блуждание нуля, смещения нуля

Для цитирования: Лузгина О. Н., Москалев С. А., Недопекин Н. В., Новоселов А. С., Папко А. А., Поспелов А. В. О возможностях выбора метода оценки дрейфовых характеристик волновых твердотельных гироскопов ГЕ 006 на основе экспериментального подтверждения // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 2. С. 53–61. doi:10.21685/2307-4205-2021-2-5

ON THE POSSIBILITIES OF CHOOSING A METHOD FOR ESTIMATING THE DRIFT CHARACTERISTICS OF GE 006 WAVE SOLID-STATE GYROSCOPES BASED ON EXPERIMENTAL CONFIRMATION

O.N. Luzgina¹, S.A. Moskalev², N.V. Nedopekin³,
A.S. Novoselov⁴, A.A. Papko⁵, A.V. Pospelov⁶

^{1, 2, 3, 4, 5, 6} Scientific Research Institute of Physical Measurements, Penza, Russia
^{1, 3, 6} incial@niifi.ru, ² moskalev_sa@niifi.ru, ^{4, 5} info@niifi.ru

Abstract. *Background.* The experience of research and development of wave solid-state gyroscopes (WGG) in the Russian Federation in comparison with similar foreign experience does not differ in a variety of techniques, among which the main place is occupied by the solution of the problems of mechanical balancing of resonators, which has proven to be an unproductive and unpredictable procedure. Along with this, it is a well-known fact that the modern HHG is controlled by four systems of automatic control of vibration energy, compensation of angular velocity, quadrature and phase. A generalized criterion for assessing the required quality of operation of these systems is the achievement of the established values of the drift characteristics of the HTG. As a rule, the terms of reference for their development set the required values of the random walk of zero σ_{ARW} [$^{\circ} / \sqrt{h}$] and zero stability b [$^{\circ} / h$] without reference to estimation methods, despite the fact that σ_{ARW} and b are included only in the nomenclature parameters estimated by Allan variations. *Materials and methods.* Allan's method of variations [1] is recognized by its developer as an alternative to the well-known methods of classical analysis of variance, which have certain limitations in assessing drifts. Along with this, when VTG GE 006 entered the market, it was necessary to face the skeptical attitude of the consumer towards the Allan method without specifying any compelling reasons for such distrust. *Results and conclusions.* It's given the purpose of this article is to justify the choice of the method for assessing the drift characteristics of the HTG GE 006 on examples of a comprehensive analysis of samples obtained in long and short runs using two drift models - Allan variations and classical analysis of variance.

Keywords: wave solid-state gyroscope, Allan variation method, non-stationary process, noise, spectra, random walk of zero, zero offsets

For citation: Luzgina O.N., Moskalev S.A., Nedopekin N.V., Novoselov A.S., Papko A.A., Pospelov A.V. On the possibilities of choosing a method for estimating the drift characteristics of GE 006 wave solid-state gyroscopes based on experimental confirmation. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2021;2:53–61. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2021-2-5

Введение

Волновыми твердотельными гироскопами называются устройства для измерения углов поворота и угловой скорости, реализованные на взаимодействии эффектов Брайана и Кориолиса, в результате которого в кромке осесимметричного резонатора формируется стоячая волна деформаций, пространственное положение которой относительно заданной системы координат пропорционально измеряемым параметрам.

Рабочие волновые процессы в резонаторе ВТГ, представляющем собой цилиндрическую или полусферическую оболочку из металла, кварца, пьезокерамики и т.д., формируются суперпозицией двух независимых модальных колебаний – первичной моды (возбуждения) и вторичной моды (измерения) вдоль осей жесткости резонатора. Для реализации процесса измерения угла и угловой скорости в резонаторе ВТГ генерируется стоячая волна на частоте, близкой или равной одной из множеств мод, чаще всего второй с не менее чем двумя каналами управления и двумя измерительными каналами так, что пучность стоячей волны расположена рядом с электродом одного из каналов управления, а вращение резонатора вокруг оси симметрии формирует силу Кориолиса, под действием которой пространственное положение стоячей волны изменяется относительно электродов возбуждения пропорционально угловой скорости вращения Ω .

Наличие разночастотности и разнодобротности колебаний резонатора по ортогональным осям приводит к ухудшению дрейфовых характеристик и в этой связи делает актуальными не только решение проблем их улучшения, но и повышение достоверности их оценок.

Классификация и методы оценки ошибок гироскопов

Традиционно ошибки инерциальных компонентов – акселерометров и гироскопов делятся на детерминированные и случайные. Для обеспечения требуемой точности гироскопа и последующих навигационных решений значимым является понимание стохастической природы этих ошибок.

Способы определения и компенсации детерминированных ошибок гироскопов хорошо исследованы и широко применяются в процессах изготовления.

Случайные шумы гироскопа представляют собой смесь разных шумов. Для понимания способов уменьшения их влияния рассмотрим особенности их проявления и модели описания, позволяющие сформулировать их идентификационные признаки.

В зависимости от методов обработки выходных сигналов гироскопа процесс идентификации шумов имеет различные результаты.

Наиболее распространенными методами оценки шумовых характеристик гироскопов являются:

– классический дисперсионный анализ, который распространяется на получение оценок шумов стационарных случайных процессов. При этом основными оценочными параметрами являются математическое ожидание (МО) и среднеквадратическое отклонение (СКО), определенные по выборке, содержащей N -результатов измерений. При эксплуатации инерциальных компонентов, оценкам дрейфовых характеристик, полученных методом статистического анализа, отдается предпочтение. Ниже будет показано, что полученные при этом результаты являются недостоверными [2].

Для оценки шумовых компонент нестационарных случайных процессов используются два метода: метод оценки спектральной плотности мощности (PSD , *Power Spectral Density*) и метод вариаций Аллана (VA).

Значимость использования этой пары методов подтверждается целями известной программы *AlaVar 5.2*, предусматривающей сочетание оценок PSD и метода Аллана.

Спектральная плотность мощности PSD описывает распределение мощности сигнала в зависимости от частоты, или мощность, приходящуюся на интервал частот, границы которого различаются на 1 Гц [Дж/Гц].

Связь между VA и PSD определяется выражением

$$\sigma^2(\tau) = 4 \int_0^{\infty} S_{\Omega}(f) \frac{\sin^4 \pi f \tau}{(\pi f \tau)^2} df, \quad (1)$$

где $S_{\Omega}(f)$ – PSD случайного процесса $\Omega(\tau)$.

Согласно этому уравнению дисперсия Аллана пропорциональна общей выходной мощности случайных процессов при пропускании через фильтр с передаточной функцией вида $\sin^4(x)/(x)^2$. Уравнение (1) является центральным элементом метода вариаций Аллана и используется для вычисления его дисперсии из PSD . При этом модель PSD любого физического процесса, подставленного в формулу (1), позволяет получить для него выражение для дисперсии Аллана $\sigma^2(\tau)$ как функции длины периода усреднения, так как значение $\sigma^2(\tau)$ является фактически измеряемой величиной, полученная кривая Аллана позволяет идентифицировать случайные процессы, существующие в виде смеси в выходных информационных потоках каждого датчика.

При этом из-за отсутствия взаимно однозначных соотношений между $\sigma^2(\tau)$ и PSD вычислить спектральную плотность из анализа $\sigma^2(\tau)$ не представляется возможным так же, как и оценить по PSD количественные характеристики шумовых процессов.

Так как полоса пропускания фильтра $\sin^4(x)/(x)^2$ зависит от времени, путем его измерения можно исследовать различные типы случайных процессов. Именно по этой причине дисперсия Аллана представляет собой эффективное средство идентификации и количественной оценки шумовых составляющих, присутствующих в информационных потоках гироскопов в виде смеси.

Для сравнения реальных возможностей интерпретации результатов записи информационных массивов ВТГ ГЕ 006 ниже представлены:

– оценки эффективности использования вариаций Аллана для идентификации шумов с целью определения гипотетических причин их возникновения и разработки алгоритмов фильтрации отдельных составляющих;

– оценка возможностей использования результатов дисперсионного анализа в качестве квалификационного критерия качества образцов гироскопов.

Для обеспечения качественных и количественных оценок шумов рассмотрим более подробно особенности использования программы *AlaVar 5.2* применительно к полученным экспериментальным данным.

В первую очередь необходимо отметить, что указанные процессы содержат высокочастотные и низкочастотные составляющие.

Высокочастотные составляющие описываются характеристиками белого шума, а низкочастотные представляют собой коррелированные шумы.

Для фильтрации высокочастотного шума в БИНС или на выходе датчика используются фильтры нижних частот или вейвлет-шумоподавление.

Коррелированные шумы можно смоделировать с достаточно высокой точностью с использованием метода Аллана в виде представления среднеквадратичной случайной ошибки дрейфа как функции времени осреднения. Отличительной особенностью метода являются возможности идентификации шести видов шумов:

1) шума квантования, характеризующего степень отличия цифровых данных от первичных аналоговых. Физической причиной возникновения подобного шума могут являться округление результата или отбрасывание младших разрядов;

2) основной шумовой компонент гироскопов – **случайное блуждание нуля** (σ_{ARW}), представляет собой аддитивный белый шум, проявляющийся в случайном отклонении от ожидаемых значений. Параметр σ_{ARW} влияет на результат интегрирования, который равен нулю при стационарном процессе. Под воздействием белого шума результаты измерений колеблются случайным образом, а среднее отклонение изменяется с увеличением времени. Для гироскопов σ_{ARW} имеет единицу измерения $^{\circ}/\sqrt{ч}$ и характеризует дрейф, ограниченный уровнем белого шума. На кривой Аллана σ_{ARW} определяется в точке ее пересечения с интервалом времени 1 с.

Процесс накопления среднеквадратического отклонения угла характеризуется отклонением

$$\sigma_0(t) = \sigma_{ARW} \sqrt{T_0 t}, \quad (2)$$

где T_0 – период дискретизации; t – интервал интегрирования;

3) **нестабильность нуля b** вызывается релаксационными шумами в конструкциях и электронных компонентах, которую связывают с фликкер-шумом, спектральная мощность которого обратно пропорциональна частоте. При этом предполагается также, что фликкер-шум представляет собой суперпозицию нескольких таких процессов [3], распространяясь на несколько частичных декад. Фликкер-шум оказывает значительное влияние на низких частотах, с увеличением частоты их интенсивность падает. При этом график мощности шума в логарифмическом масштабе медленно убывает, а на высоких частотах перекрывается белым шумом. Фликкер-шум относится к нестационарным случайным процессам. Общей теории для описания фликкер-шума до настоящего времени не существует, что привело к обоснованию подхода, основанного на дробном интегрировании спектра белого шума с передаточной функцией (ПФ) $1/\sqrt{p}$, хотя фактически показатель степени знаменателя ПФ не может изменяться от 0,5 до 1,5 [3]. Нестабильность нуля определяется по кривой Аллана на участке с нулевым наклоном, соответствующим минимальному значению угловой скорости на кривой;

4) случайное блуждание угловой скорости σ_{RRW} является винеровским случайным процессом, который формируется интегрированием белого шума с передаточной функцией $1/p$. Спектральная плотность случайного блуждания скорости обратно пропорциональна квадрату частоты. На кривой Аллана дрейф σ_{RRW} определяется по участку с наклоном + 0,5. СКО случайного блуждания скорости накапливается со временем в соответствии с соотношением

$$\sigma_{RRW}(t) = \sigma_{WN} \sqrt{T_0 t}, \quad (3)$$

где σ_{WN} – СКО порождающего белого шума.

Указанный вид шума реально измеряется гироскопом и относится к шумам неизвестной природы с очень большим временем корреляции. При этом результаты его определения зависят от изменений внешних влияющих факторов, главным образом температуры. Оценочным значением σ_{RRW} считают значение, определенное на прямой с наклоном + 0,5, в интервале, равном 3 с;

5) экспоненциально-коррелированный марковский шум с корреляцией $K_M(\tau)$ вида

$$K_M(\tau) = D_M e^{-\mu|\tau|}, \quad (4)$$

где D_M – дисперсия шума [$\text{рад}^2/\text{с}^2$]; μ – коэффициент затухания функции $K_M(\tau)$ [с^{-1}], связанный со временем корреляции соотношением $T_M = 1/\mu$.

На кривой Аллана марковский шум определяется по локальному минимуму, ограниченному слева и справа асимптотами $+0,5$ и $-0,5$ (показан на рис. 1). Указанное отличие является важным признаком идентификации марковского шума;

б) для кориолисовых гироскопов важным является также идентификация синусоидального шума, порождаемого колебаниями кромки резонатора на резонансной частоте, что формирует зашумляющий выходной сигнал ВТГ за счет псевдодетерминированной синусоидальной компоненты.

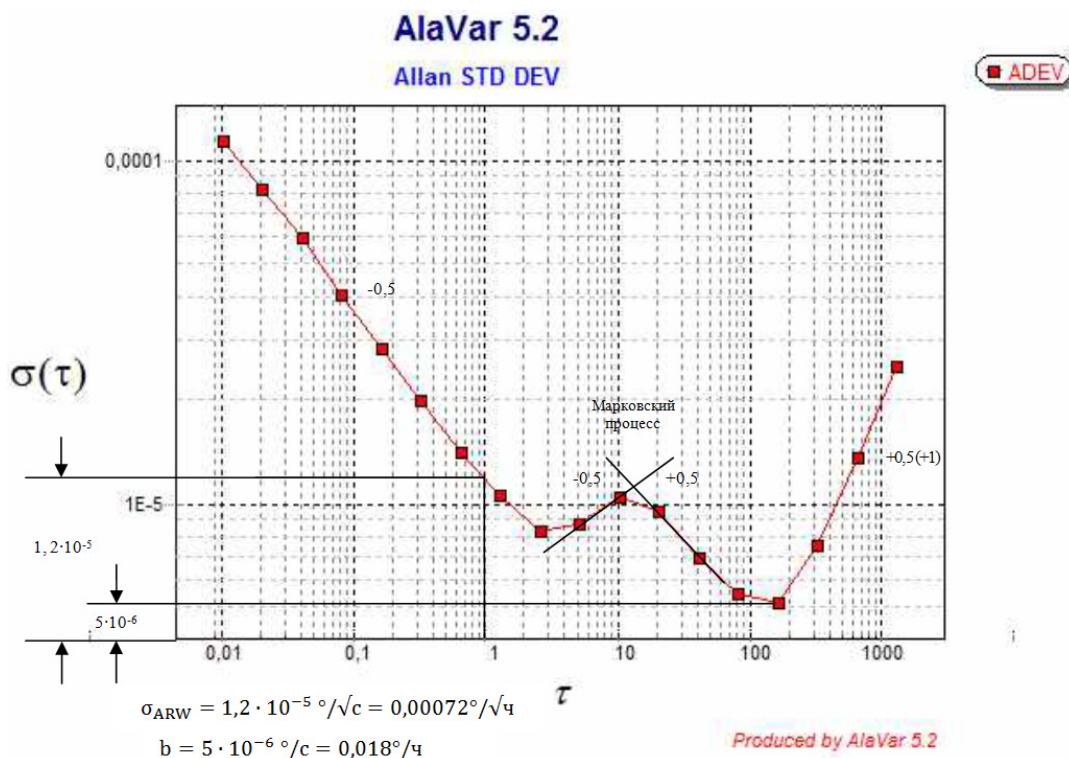


Рис. 1. График вариаций Аллана до фильтрации информационных массивов гироскопов

При частоте шума, близкой к частоте дискретизации, синусоидальный шум практически незаметен на кривой Аллана, так как теряется на фоне белого шума.

Суммарная дрейфовая составляющая с учетом значимости влияния отдельных компонент определяется в соответствии с рекомендациями [1, 4].

Анализ результатов экспериментальных исследований

1. Объектом исследования является образец ВТГ ГЕ 006 зав. № 040008, разработки и производства АО «НИИФИ».

2. Объем исследований – записи выходных сигналов ВТГ в четырех длинных запусках длительностью 3, 2, 2 и 19 ч, а также в пяти коротких запусках длительностью 5 мин каждый. Длительность перерыва между запусками – 10 мин. Накопление информационного массива проводилось в течение времени каждого запуска.

3. Обработка полученных результатов проводилась по программе AlaVar 5.2 с использованием массива Data Values и вычислением параметров PDS и $ADEV$ и представлена в табл. 1 и на рис. 1.

Представленная в табл. 1 и на рис. 1 информация интерпретируется следующим образом.

На кривой Аллана отчетливо выделяются участки с наклоном $-0,5$ (σ_{ARW}), наклоном 0 (b), марковский шум в виде пересечения двух линий с наклоном $+0,5$ и $-0,5$, а также участок с наклоном от $+0,5$ до 1 (σ_{RRW}). Синусоидальный шум не идентифицирован при всех временах запуска.

Полученные результаты оценки σ_{ARW} и b (см. табл. 1) соответствуют высоким требованиям к характеристикам разработанного ВТГ ГЕ 006.

Обращает на себя внимание некоторое несоответствие σ_{ARW} и b , что можно объяснить зашумлением $1/f$ -процесса белыми и марковскими процессами.

Таблица 1

Результаты оценки случайного блуждания нуля σ_{ARW} и нестабильности нуля b в длинных и коротких запусках по вариациям Аллана

Время непрерывной работы и номер запуска	Время перерыва, мин	Результаты оценки	
		$\sigma_{ARW}, \%/ч$	b, %ч
Длинные запуски			
3 ч, запуск 1	10	0,0015	0,018
2 ч, запуск 2	10	0,0006	0,018
2 ч, запуск 3	10	0,00072	0,018
Короткие запуски – 5 мин работы, 10 мин перерыва			
запуск 4	–	0,0006	0,020
запуск 5	–	0,001	0,025
запуск 6	–	0,001	0,025
запуск 7	–	0,001	0,025
запуск 8	–	0,002	0,018

Результаты оценки дрейфов выходного сигнала с использованием классического дисперсионного анализа с временем осреднения, равным длительности запуска, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты оценки дрейфов выходного сигнала с использованием классического дисперсионного анализа с временем осреднения, равным длительности запуска

Длительность запуска	МО, %с	СКО, %с
3 ч	–9,8140E–05	1,83582E–04
2 ч	–6,83214E–05	1,34611E–04
2 ч	–8,55897E–05	1,52900E–04
19 ч	–17,7447E–05	1,33411E–04
5 мин	1,56834E–05	1,23245E–04
5 мин	2,74534E–05	1,21902E–04
5 мин	3,87935E–05	1,24222E–04
5 мин	6,17966E–05	1,25322E–04
5 мин	6,58038E–05	1,23295E–04

Анализ данных, приведенных в табл. 2, позволяет сделать следующие выводы:

- полученные значения математического ожидания зависят от объемов выборок;
- среднеквадратические отклонения в запуске превышают значения МО примерно вдвое и менее зависимы от объемов выборок.

Ситуацию можно объяснить тем, что указанным методом оценивается вся совокупность шумов – от белого до всех степенных.

Вследствие этого, приведенные в табл. 2 оценки, не могут быть отнесены к разряду стандартных статистических моделей.

При этом полезно сослаться на группу авторов работы [2], утверждающих, что «стандартными методами статистического анализа невозможно получить никакую оценку шумовых компонент, т.е. данные методы в данном случае совершенно бесполезны».

Оценки смещения нуля b (0,018%/ч по Аллану) и математического ожидания (МО), определенно-го методом дисперсионного анализа (0,353 %/ч), отличаются более чем в девятнадцать раз. Основанием для возможности их сравнения послужил вывод, приведенный в работе [3] о том, «что 1/f-процесс может выглядеть как детерминированный процесс с добавлением белого шума и имитировать инструментальный дрейф с изменяющимися во времени средним».

Это же заключение приводит к важному выводу о необходимости приведения структуры зашумленных детерминированных процессов в реальных образцах гироскопов к детерминированным [4, 5].

Применение для этой цели адаптивной фильтрации выходного сигнала в образце ГЕ 006 зав. № 040008 улучшило оценочные параметры табл. 2 не менее, чем на порядок для МО, и более, чем на 2 порядка для СКО, обеспечив тем самым сходимость оценок между ними, а также сходимость между МО и b .

Запись вариации Аллана для фильтрованного массива представлена на рис. 2.

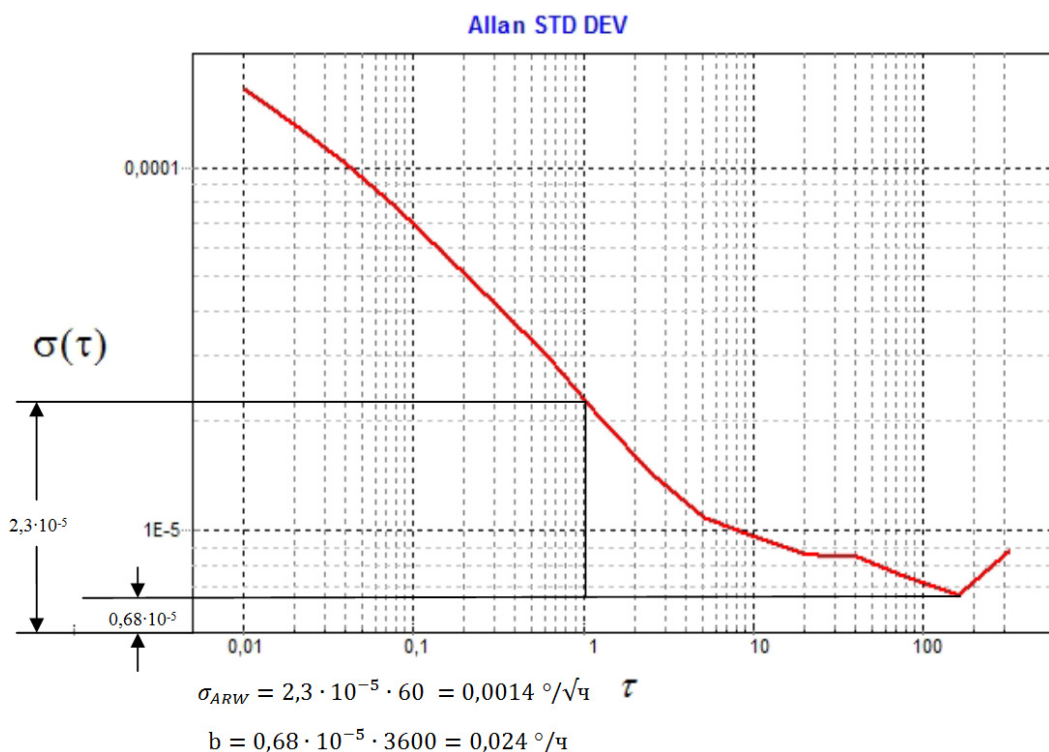


Рис. 2. График вариации Аллана после адаптивной фильтрации информационных массивов гироскопа

Сравнение кривых по рис. 1, 2 подтверждает ожидаемое изменение структуры шумов после фильтрации в виде:

- уменьшения марковских шумов;
- уменьшения наклона участка σ_{RRW} с плюс 2 до плюс 1;
- увеличения значений σ_{ARW} вдвое, а b – в 1,3 раза.

Заключение

1. В результате исследований информационных массивов ВТГ ГЕ 006 определено, что их шумовая идентификация соответствует методу вариаций Аллана и позволяет использовать его в качестве основного метода оценки дрейфовых характеристик ВТГ.

2. Статистическая обработка полученных информационных массивов отличается зависимостью математического ожидания от объемов выборки при относительно небольшом разбросе среднеквадратических значений и значительным отличием полученных числовых значений МО от смещения нуля b по Аллану.

Констатации этого факта недостаточно в связи с тем, что независимо от полученных результатов, статистические методы оценивают реальные массивы, поступающие на дальнейшую обработку в БИНС.

При этом причины получения оценок, не соответствующих ожидаемым, следует искать не в особенностях дисперсионного анализа, а в структуре самого процесса и возможностях его физического разделения на дрейфовую и детерминированную составляющие с последующим исключением детерминированной¹.

В этой связи, а также учитывая результаты предварительных оценок, актуальным можно считать дальнейшие исследования возможностей встроенной адаптивной фильтрации информационных массивов и влияние на структуру шумов и результаты оценок случайных и детерминированных составляющих.

¹ IEEE Std 1554-2005 IEEE Recommended Practice of Inertial Sensor Test Equipment, Instrumentation, Data Acquisition, and Analysis.

3. Можно считать эффективным совместное использование методов вариаций Аллана и классического дисперсионного анализа для выявления и исключения тех или иных источников дрейфа выходного сигнала гироскопа.

Список литературы

1. Аллан Д. У. Вариации Аллана: история создания, преимущества и недостатки, основные области применения // Гироскопия и навигация. 2015. № 4 (91). С. 3–28.
2. Литвин М. А., Малюгина А. А., Миллер А. Б. [и др.]. Типы ошибок в инерциальных навигационных системах и методы их аппроксимации // Информационные процессы. 2014. Т. 14, № 4. С. 326–339.
3. Miloti E. *1/f noise: a pedagogical review*. Universita di Udine and I.N.F.N., Italy, 2002.
4. Сирая Т. Н. Статистическая интерпретация вариации Аллана как характеристики измерительных и навигационных устройств // Гироскопия и навигация. 2020. Т. 28, № 1. С. 1–14.

References

1. Allan D.U. Allan's variations: the history of creation, advantages and disadvantages, main areas of application. *Гироскопия и навигация = Gyroscopy and navigation*. 2015;(4):3–28. (In Russ.)
2. Litvin M.A., Malyugina A.A., Miller A.B. [et al.]. Types of errors in inertial navigation systems and methods of their approximation. *Informatsionnye protsessy = Information processes*. 2014;14(4):326–339. (In Russ.)
3. Miloti E. *1/f noise: a pedagogical review*. Universita di Udine and I.N.F.N., Italy, 2002.
4. Siraya T.N. Statistical interpretation of the Allan variation as characteristics of measuring and navigation devices. *Гироскопия и навигация = Gyroscopy and navigation*. 2020;28(1):1–14. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Оксана Николаевна Лузгина

ведущий инженер-конструктор,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: inercial@niifi.ru

Сергей Александрович Москалев

кандидат технических наук,
заместитель генерального директора по развитию,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: moskalev_sa@niifi.ru

Никита Вячеславович Недопекин

начальник отдела,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: inercial@niifi.ru

Алексей Сергеевич Новоселов

генеральный директор,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: info@niifi.ru

Oksana N. Luzgina

Leading design engineer,
Scientific Research Institute of Physical Measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Sergey A. Moskaev

Candidate of technical sciences,
deputy general director for development,
Scientific Research Institute of Physical Measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Nikita V. Nedopekin

Head of department,
Scientific Research Institute of Physical Measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Alexey S. Novoselov

General director,
Scientific Research Institute of Physical Measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Антонина Алексеевна Папко

доктор технических наук,
главный научный сотрудник,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: info@niifi.ru

Алексей Владимирович Поспелов

главный специалист,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: inercial@niifi.ru

Antonina A. Papko

Doctor of technical sciences, chief researcher,
Scientific Research Institute of Physical Measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Alexey V. Pospelov

Chief specialist,
Scientific Research Institute of Physical Measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 15.02.2021

Поступила после рецензирования/Revised 30.03.2021

Принята к публикации/Accepted 31.03.2021

ОСНОВНЫЕ ВОПРОСЫ МЕТОДОЛОГИИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

А. М. Панкин

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия
alpank@niti.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рассмотрены основные этапы разработки алгоритмов контроля технического состояния сложных объектов, для которых предполагается создание систем диагностирования нового поколения. *Материалы и методы.* Ранее создаваемые системы диагностирования в основном ориентировались на решение задач неразрушающего контроля, которые не позволяют в достаточной мере выполнять оценку остаточного ресурса контролируемых объектов. *Результаты и выводы.* Также представлен один из алгоритмов решения задачи поиска дефекта при анализе возможной неисправности объекта, представляемого электрической цепью. Метод основан на переборе возможных топологических графов цепи при построении математических моделей объекта с разными видами дефектами.

Ключевые слова: технический объект, контроль, диагностирование, техническое состояние, диагностический признак, математическая модель, диагностическая модель, дефект, электрическая цепь

Для цитирования: Панкин А. М. Основные вопросы методологии диагностирования сложных технических объектов // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 2. С. 62–69. doi:10.21685/2307-4205-2021-2-6

THE MAIN ISSUES OF THE DIAGNOSTIC METHODOLOGY COMPLEX TECHNICAL OBJECTS

A.M. Pankin

Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia
alpank@niti.ru

Abstract. *Background.* The article discusses the main stages in the development of algorithms for monitoring the technical state of complex objects, for which it is planned to create a new generation of diagnostic systems. *Materials and methods.* Previously created diagnostic systems were mainly focused on solving the problems of non-destructive testing, which do not allow sufficient assessment of the residual life of the controlled objects. *Results and conclusions.* The article also presents one of the algorithms for solving the problem of finding a defect when analyzing a possible malfunction of an object represented by an electrical circuit. The method is based on enumeration of possible topological graphs of a chain when constructing mathematical models of an object with different types of defects.

Keywords: technical object, control, diagnostics, technical condition, diagnostic feature, mathematical model, diagnostic model, defect, electrical circuit

For citation: Pankin A.M. The main issues of the diagnostic methodology complex technical objects. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem* = Reliability and quality of complex systems. 2021;2:62–69. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2021-2-6

Введение

В методологии предлагается рассмотрение следующих вопросов:

- 1) диагностирование при отсутствии информации о структуре контролируемого объекта;
- 2) построение математической модели и определение диагностических признаков объекта;
- 3) построение диагностической модели объекта;
- 4) определение функций работоспособности и функций безопасности объекта;

- 5) оценка информативности диагностических измерений и прогнозирование остаточного ресурса;
- 6) моделирование возможных дефектов структурных элементов объекта и топологические изменения математической модели.

Диагностирование при отсутствии информации о структуре контролируемого объекта

При создании систем диагностирования объектов атомной энергетики и других ответственных объектов техники предполагается наличие математических моделей контролируемых объектов. Для менее ответственных объектов вопрос создания систем диагностирования может не ставиться, поскольку создание таких систем является достаточно затратным делом и требует не только финансовых ресурсов, но и привлечения к этой работе подготовленных специалистов. Такие специалисты целенаправленно не готовятся. Если предположить, что информация о структуре объекта отсутствует [1], то в качестве математической модели процессов в контролируемом объекте предлагается рассматривать коэффициенты передачи или передаточные функции, связывающие входные воздействия, подаваемые на объект в режиме рабочего функционирования, и выходные реакции объекта на эти воздействия. Для получения такой модели требуется измерительная информация, получаемая при работе объекта в штатном или тестовом режиме функционирования, когда подаваемые входные воздействия отличаются от номинальных значений. Последний режим необходим в случае нелинейных зависимостей между рассматриваемыми величинами. При последовательном проведении диагностических измерений в процессе эксплуатации отслеживается изменение коэффициентов передачи объекта. При приближении функций работоспособности к предельным значениям объект может перейти в неработоспособное состояние. Платой за отсутствие информации о структуре объекта и отсутствие полноценной математической модели процессов, имеющих место в контролируемом объекте при отработке им заданного ресурса, является невозможность с требуемой точностью предсказания момента времени, когда объект перейдет в неработоспособное состояние. Связано это с возможным немонотонным характером в изменении контролируемых величин.

Построение математической модели и определение диагностических признаков объекта

Создание такой модели [2], основанной на известных законах природы, необходимо для получения диагностической модели объекта и формирования набора его диагностических признаков¹. В качестве диагностических признаков (ДП) будем рассматривать некоторые структурные параметры или характеристики объекта, при нахождении которых в соответствующих диапазонах объект сохраняет работоспособное состояние по выполняемым функциям [3]. При приближении ДП к границам допустимых для работоспособного состояния областей объект диагностирования приближается к своему предельному состоянию, а его остаточный ресурс приближается к нулю.

Рассмотрим математическую модель объекта, связывающую векторы выходных реакций $\vec{Y}$ и входных воздействий $\vec{X}$ в виде $\vec{Y} = \hat{A}\vec{X}$, где в состав матрицы $\hat{A}$ входят структурные параметры объекта, часть из которых отнесем к разряду диагностических признаков $\vec{Z}$. Изменение ДП происходит со временем и зависит от внешних факторов и режимов работы объекта. При этом могут рассматриваться следующие внешние факторы:

- старение;
- тепловые поля;
- влажность;
- радиация;
- механические воздействия (удары, вибрации).

Выделим эти факторы в отдельную группу $\vec{F}$ и рассмотрим их влияние на ДП объекта $\vec{Z}$. Для этого построим функцию вида $\vec{Z} = \hat{B}\vec{F}$.

Рассмотрим задачу изменения n диагностических признаков под влиянием группы факторов $\vec{F}$, общее количество которых равно m . Будем полагать, что каждый из перечисленных факторов в течение эксплуатации объекта влияет на какое-то одно свойство части объекта или размер между его отдельными частями, изменение которых и приводит к изменению ДП объекта. Определим это

¹ ГОСТ 20911-89. Техническая диагностика. Термины и определения. М. : Изд-во стандартов, 1990.

влияние в количественной мере, рассматривая векторную функцию $\vec{F}(t)$, значения компонент которой f_i изменяются от нуля до максимального значения f_i^m , $i = 1, 2, \dots, m$. При этом будем получать относительное изменение вектора ДП как временную функцию $\vec{Z}(t)$. Относительные изменения компонент вектора $\vec{Z}$, соответствующих работоспособному состоянию объекта, будем рассматривать в диапазонах (z_i^1, z_i^2) , $i = 1, 2, \dots, n$. При выходе хотя бы одного ДП за соответствующие пределы величина одной или нескольких рабочих функций объекта будет иметь недопустимо малые или большие значения, соответствующие потере объектом работоспособного состояния.

Рассмотрим матрицу коэффициентов чувствительности l рабочих функций объекта $\vec{Y} = (y_1, y_2, \dots, y_l)$ к изменению диагностических признаков $\vec{Z}$.

Запишем ее в виде $\hat{S} = \{s_i^j\}$, где i – номер функции ($i = 1, 2, \dots, l$), j – номер диагностического признака ($j = 1, 2, \dots, n$).

Коэффициент чувствительности s_i^j представим в виде

$$s_i^j = \left\{ \frac{(y_i(t) - y_i^{\text{НОМ}})}{y_i^{\text{НОМ}}} \right\} / \left\{ \frac{(z_j(t) - z_j^{\text{НОМ}})}{z_j^{\text{НОМ}}} \right\} = \delta y_i(t) / \delta z_j(t). \quad (1)$$

По величинам коэффициентов чувствительности, полученным по математической модели объекта, составляется список потенциальных диагностических признаков объекта, количество которых стараются минимизировать для более эффективной идентификации их в последующих диагностических измерениях.

Построение диагностической модели объекта

Получение диагностической модели объекта направлено на решение следующей задачи [4]: установить связь между величинами, непосредственно измеряемыми при диагностировании (параметрами процесса) и косвенно определяемыми структурными параметрами объекта, отнесенными к числу его диагностических признаков.

При построении диагностической модели исходной является математическая модель, в которой исключается часть связей между структурными параметрами объекта и параметрами процессов, происходящих в режимах рабочего и тестового диагностирования. В результате такого преобразования в исходной математической модели (ММ) может уменьшиться количество уравнений. Однако при этом преобразовании нельзя исключать ни один ДП из установленного для объекта набора. Должны остаться в модели и все непосредственно измеряемые параметры процесса. Процесс перехода от ММ к диагностической модели может происходить разными путями. Если в ММ присутствуют дифференциальные уравнения, то вначале может выполняться переход от дифференциальных уравнений к алгебраическим путям использования конечно-разностных схем. При этом получается некоторый промежуточный вариант диагностической модели (ДМ). В полученном варианте ДМ количество уравнений и количество неизвестных диагностических признаков должно быть одинаковым, иначе невозможно решение задачи идентификации всех ДП.

Желательно, чтобы на этом этапе процесс трансформации ММ в ДМ не завершился. Конечный вариант диагностической модели хотелось бы получить в виде выражений, в которых определены зависимости каждого из диагностических признаков объекта от непосредственно измеряемых параметров процесса и, возможно, других известных величин.

К числу таких величин относятся и другие структурные параметры объекта, которые не были введены в число его диагностических признаков по разным причинам. После получения указанных соотношений для ДП в явном виде становится возможным не только определять значения диагностических признаков по результатам непосредственных измерений, но и получать оценки погрешностей для этих значений. Величины погрешностей (неопределенностей) зависят от погрешностей непосредственных измерений, а также от ряда других факторов, определяемых в каждом конкретном случае отдельно.

При проведении диагностирования какая-то часть ДП может определяться путем непосредственных измерений. Тогда они вместе с остальными измеряемыми величинами будут входить в ди-

агностическую модель объекта для идентификации оставшихся неизвестных диагностических признаков.

Таким образом, в качестве основного назначения диагностической модели является установление связи в виде полученной аналитической зависимости между неизвестными диагностическими признаками в модели объекта и непосредственно измеряемыми в диагностическом процессе величинами. Она также используется для оценок погрешностей определения этих ДП.

Определение функций работоспособности и функций безопасности объекта

После построения структурной схемы с учетом приемлемого уровня детализации определяют параметры структурных единиц схемы, из которых часть параметров выбирается в качестве ДП объекта.

Приемлемый уровень детализации выбирается исходя из реальных пределов при дроблении объекта на более мелкие части, которые диктуются экономическими соображениями, исходя из которых, контролировать и заменять в случае ремонта объекта проще отдельные блоки, а не отдельные элементы этих блоков. Так мы подходим к *нижней границе*, до которой доходит детализация при создании математической модели контролируемого объекта.

В то же время параметры структуры объекта должны как-то отражать протекающие в них физические процессы. Тогда на основе известных законов природы становится понятным и измерение параметров процесса, протекающего в объекте, и идентификация его структурных параметров на основе измеренных параметров процесса.

При недостатке измерительной информации по непосредственно измеряемым в процессе диагностирования величинам выполняется укрупнение элементов объекта и переход к его новым структурам. При этом понятно, что диагностические признаки новых структур в виде диагностических характеристик будут значительно сложнее диагностических параметров прежней структуры. Это вызывает определенные трудности при нахождении допусковых границ новых ДП и отслеживания в изменениях этих характеристик при эксплуатации объекта.

При определении *верхней границы* детализации структуры объекта желательно получить такую структурную схему, которая включает элементы с параметрами, имеющими простой физический смысл. А также для этой схемы должна быть при диагностировании получена необходимая для идентификации параметров структуры объекта измерительная информация. Тогда отпадает необходимость укрупнения в одну структурную единицу элементов разной физической природы (например, резистор и индуктивность), что значительно усложняет диагностическую характеристику нового ДП.

С параметрами структуры объекта связан вопрос о *рабочих функциях* диагностируемого объекта, которые были определены конструктором изделия на этапе его проектирования. Уже упоминалось, что рабочие функции представляют величины, связанные с протекающими в объекте процессами.

Если такой функцией в объекте электрической природы является мощность, выделяемая, например, в резисторе, то ее можно определить в виде произведения двух параметров электрического процесса: тока и напряжения.

Если рабочей функцией является уже энергия, которая снимается или выделяется в данном элементе цепи, то к двум указанным величинам добавится третья – время. Тогда эта функция будет определяться как интеграл от указанного произведения по времени, если подынтегральная величина не будет постоянной на интервале интегрирования.

Из этих примеров уже видно, какое количество и разнообразие рабочих функций может рассматриваться. И с рассмотрением новых объектов это количество и их спектр будут только увеличиваться и расширяться. Поэтому к определению количества и номенклатуры рабочих функций следует переходить после определения конкретного объекта диагностирования, так как создание алгоритмов диагностирования требует значительных средств.

В то же время даже при рассмотрении алгоритмов диагностирования в общем виде следует принимать во внимание еще один класс функций, которые определим как *функции безопасности* объекта. При рассмотрении ряда объектов диагностирования (ОД) можно выделить в них такие элементы структуры, которые не оказывают существенного значения на выполнение объектом определенных для него рабочих функций. Однако изменение параметров этих элементов может привести к ситуации, когда режим штатного функционирования должен быть остановлен вследствие возмож-

ных тяжелых последствий как для самого объекта, так и для его возможного окружения, в том числе и людей.

Допустим, в электрической цепи есть участок, представляющий параллельное соединение двух и более резисторов. Если одна из ветвей оказалась разорванной, то через оставшиеся резисторы пойдет ток большей величины. Это возможно не окажет заметного влияния на выполнение объектом своих рабочих функций, однако дополнительное тепловыделение в оставшихся элементах за счет возросшего тока может привести к полному разрыву этого участка цепи за счет «лавины отказов». В результате получим отказ по всем рабочим функциям объекта с возможными последствиями для окружающих объектов. Этот пример показывает, что в структуре объекта диагностирования должны определяться элементы и соединения, которые играют роль «слабого звена», отказ которого должен приводить к остановке ОД, даже при штатном функционировании.

Возьмем другой пример. При изменении состояния сварного шва на каком-то участке трубопровода могут не изменяться параметры процесса по перемещению вещества в нем. Трубопровод при этом продолжает выполнять возложенные на него рабочие функции (например, по пропускной способности). Однако при дальнейшей разгерметизации трубопровода может возникнуть аварийная обстановка со всеми вытекающими последствиями. Понятно, что после ее возникновения данный объект не рассматривается как находящийся в работоспособном состоянии.

Подведем итог и сделаем следующий вывод: в процессе диагностирования должен выполняться контроль параметров структуры, не только связанных с рабочими функциями объекта, но и следует выполнять контроль тех параметров структуры, которые связаны с обеспечением безопасности объекта (*функции безопасности*).

Отметим, что в последнем примере функция безопасности представляется структурным параметром объекта. Этот параметр может контролироваться как дополнительный диагностический признак объекта. Иначе говоря, в функциях безопасности сочетаются величины, связанные как с параметрами процесса, так и со структурными параметрами объекта, что говорит о наличии тесной связи между этими величинами при диагностировании. При построении методологии контроля технического состояния рассматриваются разные подходы [5].

Оценка информативности диагностических измерений и прогнозирование остаточного ресурса

При проведении диагностирования используются измерительные приборы, а также информационно-измерительные системы [6], дающие результаты измерений с какой-то погрешностью. При переходе с помощью диагностических моделей от непосредственно измеряемых величин к контролируемым параметрам (диагностическим признакам) к погрешности результатов непосредственных измерений добавится компонента погрешности, связанная с этим переходом. Величина итоговой погрешности приобретает особое значение при приближении диагностического признака к своим предельным значениям, поскольку в зависимости от полученной величины погрешности этого параметра может быть поставлен тот или иной диагноз. Для того, чтобы разобраться с величиной получаемой итоговой погрешности идентифицируемого диагностического признака, нужно учитывать погрешность измерения определяемой при диагностировании величины и трансформацию этой погрешности при переходе к конкретному ДП объекта по его диагностической модели. Если для определения одного и того же ДП могут быть использованы измерения разных величин, позволяющих определить техническое состояние объекта, то с учетом сказанного будут получаться разные итоговые погрешности в процедуре оценки этого диагностического признака. В итоге мы приходим к выводу, что из перечисленных возможных измерений какого-то набора величин, измерение одной величины позволяет получить данный ДП с минимальной погрешностью. Таким образом, возникает необходимость во введении того или иного численного критерия [7] для оценки степени полезности данного измерения для повышения вероятности правильной постановки диагноза о том или ином техническом состоянии объекта безотносительно к тому, какое это состояние (например, при выборе из двух возможных: работоспособное, неработоспособное). Для этого вводится понятие информативности конкретного измерения при его использовании для идентификации конкретного ДП на основе полученной диагностической модели объекта.

Информативность отдельного измерения для целей диагностирования объекта определяется как величина, оценивающая вероятность правильной постановки диагноза о техническом состоянии объекта по диагностическому признаку, определенному по данному измерению.

В качестве количественной оценки информативности измерения предлагается использовать коэффициент информативности, изменяющийся так же, как и величина вероятности, в пределах от 0 до 1. Отличие этого коэффициента от вероятности в том, что он не привязан к оценке вероятности того или иного исхода при диагнозе технического состояния объекта. Практическое значение во введении такой величины обусловлено возможностью выбора на этапе проектирования объекта контрольных точек для подключения измерительной аппаратуры на этапе эксплуатации этого же объекта с целью определения диагностических признаков с меньшей погрешностью, а постановки диагноза о состоянии объекта по этому признаку с большей вероятностью.

На основе проведенного анализа возможных ситуаций [4] можно заключить следующее:

1. Вероятность правильного заключения о техническом состоянии объекта в ряде случаев определяется не точностью проводимых измерений, а соотношением между границами двух интервалов:

- интервала работоспособного состояния;
- интервала, который устанавливает неопределенность измеренной величины (в котором находится неизвестное истинное значение).

2. Об информативности того или иного диагностического измерения можно судить по величине коэффициента информативности, определяемого, например, по формуле

$$I_i = \frac{A_i \left| P_{1i} - \frac{1}{2} \right|}{\left| P_1^0 - \frac{1}{2} \right| + 1} = \frac{A_i \left| P_{2i} - \frac{1}{2} \right|}{\left| P_2^0 - \frac{1}{2} \right| + 1}, \quad (2)$$

где P_1^0, P_2^0 – априорные вероятности нахождения объекта в технически исправном и неисправном состояниях; P_{1i}, P_{2i} – апостериорные вероятности нахождения объекта в технически исправном и неисправном состояниях по результатам i -го измерения; A_i – нормировочный коэффициент, который переводит величину информативности i -го диагностического измерения в интервал значений $0 \leq I_i \leq 1$.

Определяющей величиной в формуле (2) является степень отклонения вероятности нахождения в работоспособном состоянии или вероятности для альтернативного состояния от 0,5 при наличии двух возможных гипотез о техническом состоянии.

Возможны и другие оценки величины информативности I_i . Для этого в коэффициент A_i требуется ввести дополнительную информацию о соотношениях между длинами интервалов значений диагностического параметра, допустимых для работоспособного (технически исправного) состояния и интервала неопределенности для этого параметра по результатам того или иного диагностического измерения или между границами указанных интервалов.

3. Существенным моментом можно считать рассмотрение максимальной величины погрешности измерения на основе того или иного закона распределения вероятности случайной величины. Особенно важно это в той ситуации, когда значение измеренной величины приближается к границам интервала значений параметра, допустимых для исправного состояния элемента или объекта. Тогда повышается вероятность появления ошибок первого и второго рода.

Величина информативности диагностического измерения оценивается по значению коэффициента информативности, который вычисляется, например, по формуле (2) и изменяется в некотором диапазоне положительных значений (0; 1). Как было отмечено, коэффициент A_i в формуле (2) – некоторый нормировочный коэффициент. Если эту формулу модифицировать, то ее можно применить для задачи прогнозирования остаточного ресурса контролируемого объекта. При этом для определения величины информативности (коэффициента информативности) измерений вместо формулы (2) предлагается использовать формулу (3)

$$I_i = \frac{A_p A_i \cdot \left| P_{1i} - \frac{1}{2} \right|}{\left| P_1^0 - \frac{1}{2} \right| + 1}, \quad (3)$$

в которой коэффициент A_p (коэффициент прогноза) рассчитывается по формуле

$$A_p = 1 - b_0 |R - R^n| / \Delta. \quad (4)$$

В формуле (4): Δ – один из двух возможных допусков на значение контролируемого параметра (верхний допуск Δ^+ , нижний допуск Δ^-); R^n – номинальное значение, задаваемое для измеряемого параметра R ; b_0 – коэффициент, задаваемый в пределах $0,5 \leq b_0 < 1$.

При прогнозировании технического состояния могут использоваться и другие подходы [8].

Моделирование возможных дефектов структурных элементов объекта и топологические изменения математической модели

Ранее рассмотренные вопросы относились к таким задачам технической диагностики, как контроль технического состояния (КТС) объекта и прогнозирование его остаточного ресурса. В том случае, если по результатам КТС объект находится в технически неисправном (неработоспособном) состоянии возникает необходимость в решении еще одной задачи: поиск неисправности. В данной методологии для решения этой задачи предлагается использование семейства математических моделей контролируемого объекта для проведения имитационного моделирования возможных неисправностей. Для объектов электротехнического назначения [9–12], которые рассматривались в данной работе, внесение дефектов выполнялось путем моделирования возможных разрывов и коротких замыканий между отдельными элементами исходной схемы электрической цепи контролируемого объекта. В результате такого изменения связей между элементами схемы изменялась топология электрической цепи. Это отражалось при построении топологического графа новой цепи и, как следствие, на основе законов Кирхгофа, изменялась математическая модель объекта, по которой при заданных номинальных входных воздействиях оценивалось изменение рабочих функций и функций безопасности объекта. Путем перебора возможных новых связей между отдельными частями контролируемого объекта и возможных разрывов между исходными связями создается семейство математических моделей, из которого только некоторая часть имеет право на рассмотрение при практической реализации. Для этой части фиксируются значения рабочих функций, которые рассматриваются при поиске возможных дефектов. При программировании алгоритма поиска вся задача сводится к введению в программу набора матриц главных сечений (или информационных матриц) и проведению вариантного расчета электрической цепи с разными матрицами, что представляет не сложную задачу при наличии соответствующей программы. Для поиска дефектных элементов может рассматриваться ряд других подходов [13].

Список литературы

1. Панкин А. М. Диагностирование электрических цепей при неизвестной топологии схемы // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2002. С. 425–427.
2. Калявин В. П., Панкин А. М. Основы теории надежности и технической диагностики элементов и систем ЯЭУ : учеб. пособие. СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2007. 213 с.
3. Панкин А. М. Некоторые вопросы методологии диагностирования непрерывных технических объектов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2010. Т. 1. С. 42–48.
4. Панкин А. М. Разработка теории и методов контроля технического состояния изделий и систем атомной энергетики : дис. ... д-ра техн. наук / Панкин А. М. СПб., 2019.
5. Северцев Н. А. Методология сложных систем в обеспечении безопасности и работоспособности // Фундаментально-прикладные проблемы безопасности, живучести, надежности, устойчивости и эффективности систем : материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 95-летию со дня рождения выдающегося ученого академика АН СССР (РАН) Всеволода Сергеевича Авдуевского. Елец, 2017. С. 17–29.
6. Юрков Н. К., Прошин А. А., Горячев Н. В. Синтез структуры многоканальной информационно-измерительной системы // Надежность и качество сложных систем. 2020. № 3. С. 64–71.
7. Гаскаров Д. В. [и др.]. Выбор информативных параметров при контроле качества изделий электронной техники. Л. : ЛДНТП, 1979. 32 с.
8. Жаднов В. В. Анализ методик прогнозирования межповерочных интервалов электронных измерительных приборов // Мир измерений. 2016. № 2. С. 24–36.
9. Башарин С. А., Федоров В. В. Теоретические основы электротехники. Теория электрических цепей и электромагнитного поля : учеб. пособие. М. : ACADEMA, 2004. 304 с.
10. Диагностика и идентификация электрических цепей : межвуз. сб. науч. тр. / отв. ред. Н. В. Киншт. Владивосток : ДВПИ, 1989. 172 с.
11. Korovkin N. V., Selina E. E. An efficient method of wave processes in transmission simulation using discrete models // IEEE EMC Symp. 1998. Vol. 2. P. 946–951.

12. Кофанов Ю. Н. Методы теории параметрической чувствительности радиоэлектронных средств : учеб. пособие. М. : Моск. ин-т электронного машиностроения, 1991. 174 с.
13. Иванов И. А., Конашенкова А. Ю., Лышов С. М., Увайсов С. У. Оценка достоверности выявления дефектов печатного узла с использованием встроенных эмуляторов генерации вибрационных колебаний // Качество. Инновации. Образование. 2016. № 11. С. 55–60.

References

1. Pankin A.M. Diagnostics of electrical circuits with an unknown circuit topology. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2002;425–427. (In Russ.)
2. Kalyavin V.P., Pankin A.M. *Osnovy teorii nadezhnosti i tekhnicheskoy diagnostiki elementov i sistem YaEU: ucheb. posobie = Fundamentals of the theory of reliability and technical diagnostics of elements and systems of nuclear power plants : textbook*. Saint-Petersburg: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2007:213. (In Russ.)
3. Pankin A.M. Some questions of the methodology for diagnosing continuous technical objects. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2010;1:42–48. (In Russ.)
4. Pankin A.M. Development of the theory and methods of monitoring the technical condition of nuclear power products and systems. DSc dissertation. Saint-Petersburg, 2019. (In Russ.)
5. Severtsev N.A. Methodology of complex systems in ensuring security and operability. *Fundamental'no-prikladnye problemy bezopasnosti, zhivuchesti, nadezhnosti, ustoychivosti i effektivnosti sistem: materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., posvyashch. 95-letiyu so dnya rozhdeniya vydayushchegosya uchenogo akademika AN SSSR (RAN) Vsevoloda Sergeevicha Avduevskogo*. Elez, 2017:17–29. (In Russ.)
6. Yurkov N.K., Proshin A.A., Goryachev N.V. Synthesis of the structure of a multi-channel information and measurement system. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2020;(3):64–71. (In Russ.)
7. Gaskarov D.V. [et al.]. *Vybor informativnykh parametrov pri kontrole kachestva izdeliy elektronnoy tekhniki = Selection of informative parameters for quality control of electronic equipment products*. Leningrad: LDNTP, 1979:32. (In Russ.)
8. Zhadnov V.V. Analysis of methods for predicting the calibration intervals of electronic measuring devices. *Mir izmereniy = The world of dimensions*. 2016;(2):24–36. (In Russ.)
9. Basharin S.A., Fedorov V.V. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki. Teoriya elektricheskikh tsepey i elektromagnitnogo polya: ucheb. posobie = Theoretical foundations of electrical engineering. The theory of electric circuits and the electromagnetic field: a textbook*. Moscow: ACADEMA, 2004:304. (In Russ.)
10. Kinsht N.V. (ed.). *Diagnostika i identifikatsiya elektricheskikh tsepey: mezhvuz. sb. nauch. tr. = Diagnostics and identification of electrical circuits : interuniversity collection of scientific papers*. Vladivostok: DVPI, 1989:172. (In Russ.)
11. Korovkin N.V., Selina E.E. An efficient method of wave processes in transmission simulation using discrete models. *IEEE EMC Symp*. 1998;2:946–951.
12. Kofanov Yu.N. *Metody teorii parametricheskoy chuvstvitel'nosti radioelektronnykh sredstv: ucheb. posobie = Methods of the theory of parametric sensitivity of radio-electronic means : a textbook*. Moscow: Mosk. in-t elektronnoy mashinostroyeniya, 1991:174. (In Russ.)
13. Ivanov I.A., Konashenkova A.Yu., Lyshov S.M., Uvaysov S.U. Evaluation of the reliability of detecting defects in the printing unit using built-in emulators for generating vibration vibrations. *Kachestvo. Innovatsii. Obrazovanie = Quality. Innovations. Education*. 2016;(11):55–60. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Александр Михайлович Панкин

доктор технических наук, доцент,
доцент высшей школы атомной и тепловой энергетики,
Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29)
E-mail: alpank@niti.ru

Alexander M. Pankin

Doctor of technical sciences, associate professor,
associate professor of Higher School of Nuclear
and Thermal Power Engineering,
Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University
(29 Polytechnicheskaya street, St. Petersburg, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 02.04.2021

Поступила после рецензирования/Revised 15.04.2021

Принята к публикации/Accepted 17.04.2021

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПОВЕРКИ КИЛОВОЛЬТМЕТРОВ

А. С. Ильин

Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
Научно-исследовательский институт электронно-механических приборов, Пенза, Россия
aalexii@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Актуальность разрабатываемой информационно-измерительной системы для поверки киловольтметров определяется постоянно растущими требованиями к модернизации и совершенствованию метрологического обеспечения новых средств измерений высоких напряжений. Однако, кроме обеспечения требуемых метрологических характеристик, возникает необходимость обеспечения работоспособности системы при возникновении электрических пробоев изоляции цепей высокого напряжения, а также защиты персонала от поражения электрическим током. Рассмотрены технические мероприятия, касающиеся надежности и безопасности информационно-измерительной системы для поверки киловольтметров. Целью работы является ознакомление с результатами разработки установки для поверки киловольтметров УПК-30ПТ, а также описание функционирования защиты от разрушения при возникновении электрических пробоев и персонала от поражения электрическим током. *Материалы и методы.* Для решения данной задачи использовались требования нормативно-технических документов ГОСТ 12.3.019-80. *Результаты.* В ходе работы разработана система защиты персонала от поражения электрическим током информационно-измерительной системы для поверки киловольтметров УПК-30ПТ и повышена надежность при работе на высоком напряжении. *Выводы.* Положительные результаты работы открывают перспективу создания системы защиты для малогабаритных и автоматизированных информационно-измерительных систем с рабочими напряжениями до 100 кВ и более.

Ключевые слова: высокое напряжение, электроустановка, надежность, защита, управление, электрическая блокировка

Для цитирования: Ильин А. С. Технические средства защиты информационно-измерительной системы поверки киловольтметров // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 2. С. 70–77. doi:10.21685/2307-4205-2021-2-7

TECHNICAL MEANS OF PROTECTION INFORMATION-MEASURING SYSTEM CALIBRATION OF KILOVOLTMETERS

A.S. Ilin

Penza State University, Penza, Russia
Scientific and Research Institute of Electronic Mechanic Instruments, Penza, Russia
aalexii@mail.ru

Abstract. *Background.* The relevance of the developed information and measuring system for calibrating kilovolts is determined by the constantly growing requirements for the modernization and improvement of the metrological support of new high voltage measuring instruments. However, in addition to ensuring the required metrological characteristics, it becomes necessary to ensure the reliability of the system in the event of electrical breakdowns in the insulation of high voltage circuits, as well as to protect personnel from electric shock. This article discusses technical measures regarding the reliability and safety of the information-measuring system for checking the kilovolts. *Materials and methods.* To solve this problem, the requirements of the normative technical documents GOST 12.3.019-80 were used. *Results.* In the course of the work, a system for protecting personnel from electric shock was developed for the information-measuring system for checking the UPK-30PT kilovolts and the reliability was increased when operating at high voltage. *Conclusions.* The positive results of the work open up the prospect of creating a protection system for small-sized and automated information-measuring systems with operating voltages up to 100 kV and more.

Keywords: high voltage, electrical installation, reliability, security, management, electrical interlocking

For citation: Ilin A.S. Technical means of protection information-measuring system calibration of kilovolts. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2021;2:70–77. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2021-2-7

Создание и широкое применение в последние годы новых средств измерений высоких (до 30 кВ) напряжений классов 1, 0,5 % вызвало настоятельную необходимость модернизации и совершенствования не только их метрологического обеспечения, но и повышения надежности работы при возникновении аварийных ситуаций (пробоях изоляции и цепях высокого напряжения), а также совершенствование системы защиты обслуживающего персонала от поражения электрическим током.

Анализ нормативно-технической литературы позволил выделить ряд технических решений, которые были реализованы в информационно-измерительной системе для поверки киловольтметров УПК-30ПТ (ИИС). Структура комплексной защиты ИИС поверки киловольтметров изображена на рис. 1.

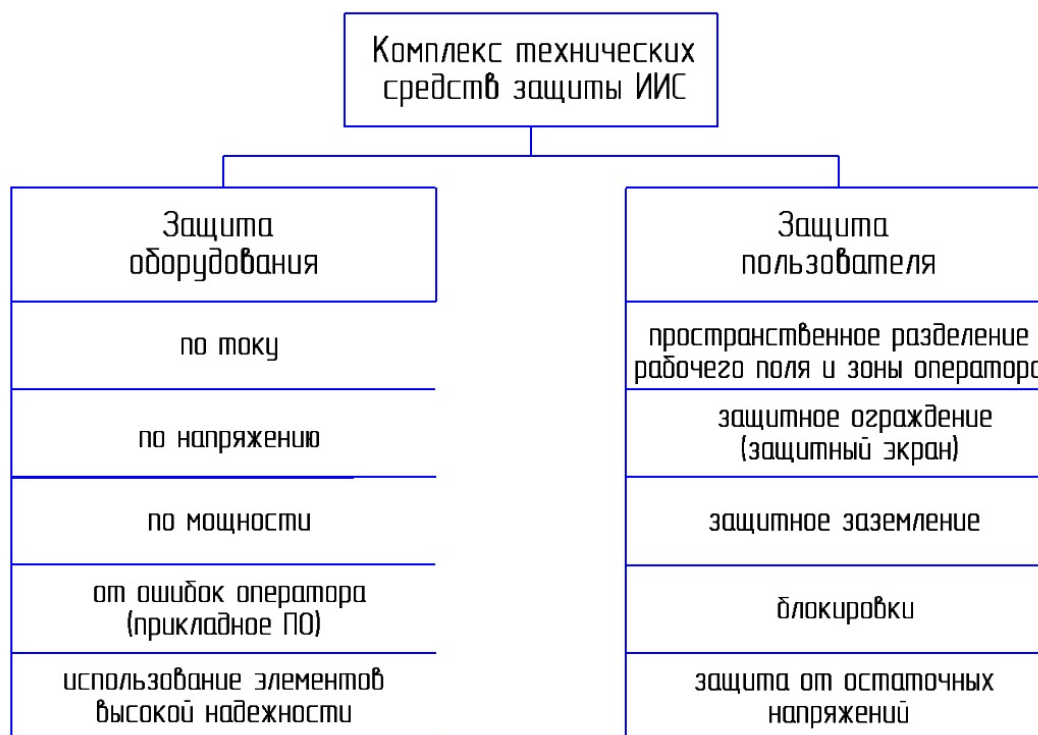


Рис. 1. Структура комплексной защиты ИИС поверки киловольтметров

Комплекс технических средств защиты ИИС подразделяется на средства защиты оборудования (столбец 1), обеспечивающие работоспособность ИИС, и средства защиты пользователя (столбец 2), обеспечивающие безопасность работы пользователя [1].

Защита оборудования включает защиту: по току, напряжению, мощности, от ошибок оператора (в прикладном ПО), а также благодаря использованию элементов высокой надежности.

Защита по току, напряжению и мощности

В соответствии с требованиями ГОСТ IEC 61010-2014 защита должна [2, 3]:

- при КЗ исключать переход в режим ограничения тока и обязана производить отключение высокого напряжения;
- при возникновении перенапряжений по высоковольтному выходу осуществлять выключением регулирующих элементов. При этом может быть дополнительно установлен разрядник, который включается между высоковольтным выходом и корпусом блока;
- при выделении в высоковольтной цепи энергии более 10–100 Дж производить отключение высокого напряжения.

Для защиты системы по току, напряжению и мощности выбран малогабаритный высоковольтный источник напряжения фирмы Spellman, который имеет защиту по указанным параметрам, но и возможность подключения блокировки.

Токовая защита выполнена с использованием контура стабилизации по току (режим стабилизации тока). Ограничение тока или его стабилизация на заданном уровне осуществляется путем сравнения сигнала ОС с управляющим токовым сигналом. В режиме стабилизации тока выходной

ток источника ограничивается до заданного уровня даже в случае продолжительного короткого замыкания на выходе. В данном режиме блок питания работает на максимально допустимой для него мощности [4].

Дополнительно реализована защита по входному опорному напряжению. При возникновении перегрузок с помощью транзисторной оптопары происходит замыкание вывода на нулевую шину питания 0 В. Благодаря чему превышение опорного напряжения производит блокировку источника и отключение высокого напряжения.

Если мощность нагрузки превышает выходную мощность источника питания (обычно на 5–15 %), то срабатывает защита по мощности.

Защита в прикладном программном обеспечении

В качестве одной из мер по обеспечению безопасности системы служит программное обеспечение, являющееся управляющей программой.

ГОСТ Р МЭК 61508-3-2012 требует блокировать процессы выполнения задач (остановка выполнения программы) в случае ошибочных действий оператора [5, 6].

При использовании ПК в программе управления реализованы блокировки от ошибочных действий оператора, а также аварийное ручное и автоматическое отключение высокого напряжения. В качестве ручного отключения высокого напряжения в ПО имеется кнопка аварийного выключения высокого напряжения «ОСТАНОВИТЬ».

ПО предусматривает защиту в случае неверно заданного управляющего напряжения для источника высокого напряжения. Для обеспечения безопасности при работе с высоким напряжением после каждой контрольной точки предусмотрено отключение высокого напряжения переход установки в режим ожидания.

Элементы надежности

Наличие острых выступов на поверхности электродов, высоковольтной шине и болтов подключения могут создавать местные искажения электрического поля. Вследствие чего существует большая вероятность преждевременного коронирования и потери энергии. Для предотвращения повышения напряженности электрического поля и возникновения коронного разряда на рабочем поле, шина высокого напряжения, электроды образцового ДНВ, а также болты подключения высоковольтных проводов имеют цилиндрическую форму с большим радиусом закругления.

Изоляция токоведущих частей электрического оборудования увеличивает безопасность, а также надежность работы электроустановок. Обеспечение надежности изоляции достигается правильным выбором ее материала и геометрии (толщина, форма), обусловленной в первую очередь значением рабочего напряжения и конструкцией оборудования.

Токоведущая шина или шина высокого напряжения предназначена для подключения источника высокого напряжения и объектов нагрузки. Шина выполнена в виде медного металлического прутка, находящегося внутри диэлектрической трубы, концы которой закреплены к внутренним поверхностям боковых стенок камеры. В качестве материала диэлектрической трубы выбран полимер. Для повышения надежности конструкции между трубой и верхней стенкой камеры установлены две диэлектрические растяжки.

Источник высокого напряжения, являющийся частью системы, имеет изолированный высоковольтный провод для подключения к токоведущей шине. Высоковольтный провод источника представляет собой жилу (гибкая луженая медная проволока), полупроводящий слой и внешнюю основную изоляцию (силиконовая резина).

Также к токоведущей шине крепятся концы двух высоковольтных проводов, соединяющих шину с высоковольтными вводами образцового делителя напряжения высоковольтного и поверяемого делителя напряжения высоковольтного. В процессе работы выбраны силиконовые высоковольтные провода, применяемые в высоковольтных испытательных установках и позволяющие выдерживать напряжения до 100 кВ.

Защита пользователя представляет комплекс технических средств защиты при работе с высоким напряжением и относится непосредственно к безопасности системы. Учитывая правила по охране труда при эксплуатации электроустановок и требования ГОСТ 12.3.019-80, работа с напря-

жением выше 1000 В должна проводиться при наличии защитных ограждений рабочего поля с использованием защитного заземления, электрических блокировок, изоляции токоведущих частей, световой и звуковой индикации.

Защита пользователя включает в себя: пространственное разделение рабочего поля и зоны оператора, защитное ограждение, защитное заземление, блокировку, защиту от остаточных зарядов внутри ограждения.

Пространственное разделение рабочего поля и зоны оператора

В целях безопасности система делится на низковольтную (зона оператора) и высоковольтную (рабочее поле) части.

Зона оператора представляет собой рабочее место персонала и состоит из четырех блоков: ПК, образцового цифрового вольтметра, цифрового вольтметра поверяемого делителя напряжения высоковольтного и регулируемого источника опорного напряжения.

Высоковольтная часть устанавливается на рабочем поле и состоит из двух блоков: управляемого источника высокого напряжения, образцового делителя напряжений и поверяемого делителя напряжений высоковольтного.

Защитное ограждение

Защитные ограждения применяются для защиты от прямого прикосновения к токоведущим частям или приближения к ним на опасное расстояние. Ограждения могут быть выполнены в виде оболочек, барьеров, камер или отдельных помещений.

Для рассматриваемой ИИС разработана и выполнена экранированная измерительная камера, предназначенная для отделения электрических цепей и/или проводников от опасных токоведущих частей с помощью электрического защитного экрана, присоединенного к системе защитного уравнивания потенциалов и предназначенного для обеспечения защиты от поражения электрическим током. Камера выполнена в настольном исполнении и представляет собой электрический защитный экран.

С лицевой стороны камеры (для удобства эксплуатации) имеются двери, изготовленные из металлической сетки, для установки и наблюдения за поверяемым устройством¹.

В соответствии с п. 5.6 ГОСТ 12.3.019-80 расположение шины высокого напряжения выбрано так, что расстояние между шиной и металлическими частями корпуса и других заземленных элементов – не менее 0,5 м для испытательного напряжения постоянного тока 30 кВ².

Источник расположен на недосягаемом для прикосновения оператором уровне в процессе эксплуатации установки. В центре камеры с учетом безопасного расстояния 0,5 м устанавливаются образцовый и поверяемый ДНВ.

Все низковольтные сигнальные и заземляющие провода, расположенные в экранированной измерительной камере, уложены в кабель-каналы.

Защитное заземление

Заземлением электроустановки называют преднамеренное электрическое соединение ее с заземляющим устройством. Заземляющее устройство состоит из заземлителя и заземляющих проводов. Заземлителем называются металлический стержень, провод, лист, полоса или металлический предмет другой формы, соединяющий заземленную часть электроустановки с землей. Заземляющим проводником называются металлические проводники, которыми заземляемые части электроустановки соединяются с заземлителем или контуром заземления.

Защитное заземление снижает до безопасной величины напряжение относительно земли на металлических частях оборудования, которые не находятся под напряжением, но могут оказаться

¹ ГОСТ ИЕС 61010-1-2014 Безопасность электрических контрольно-измерительных приборов и лабораторного оборудования. Часть 1. Общие требования.

² ГОСТ 12.3.019-80 Система стандартов безопасности труда. Испытания и измерения электрические. Общие требования безопасности.

под напряжением вследствие нарушения изоляции электроустановок. В результате замыкания на корпус заземленного оборудования снижается напряжение прикосновения и, как следствие, ток, проходящий через тело человека, при его прикосновении к оборудованию.

Все оборудование, расположенное на рабочем поле, имеет одно общее защитное заземление благодаря клеммам заземления (рис. 2).

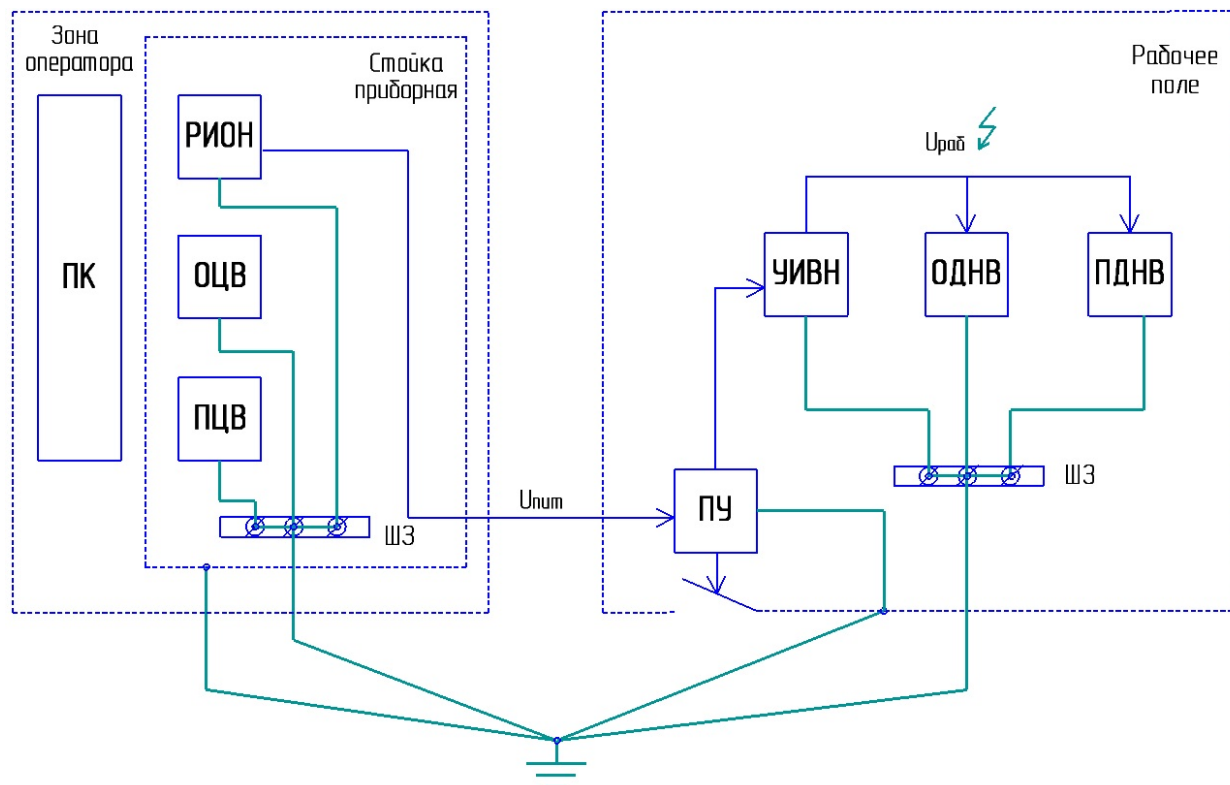


Рис. 2. Защитное заземление ИИС: ПК – персональный компьютер; РИОН – регулируемый источник опорного напряжения; ОЦВ – образцовый цифровой вольтметр; ПЦВ – поверяемый цифровой вольтметр; ПУ – панель управления; ШЗ – шина заземления; УИВН – управляемый источник высокого напряжения; ОДНВ – образцовый делитель напряжения высоковольтный; ПДНВ – поверяемый делитель напряжения высоковольтный

Каждый блок, расположенный в измерительной камере, присоединен к медной шине заземления с помощью отдельного ответвления. Последовательное включение нескольких заземляемых объектов в заземляющий проводник запрещено. Низковольтное оборудование, расположенное на приборной стойке в зоне оператора, также отдельными проводниками подключено к медной шине заземления. Защитное заземление имеют непосредственно сама экранированная измерительная камера, а также приборная стойка. Все оборудование ИИС поверки киловольтметров заземляется в одну точку.

Блокировка

Для увеличения безопасности и предотвращения аварийных ситуаций применяются электрические блокировки, способные разрывать цепь питания и подачу высокого напряжения на рабочее поле.

Электрическая блокировка воздействует только на контакты электрической цепи. Она может применяться при любых расстояниях от защищаемого объекта. Принцип действия электрической блокировки состоит в том, что открытие дверей ограждения электроустановки сопровождается разрывом блокировочных контактов электрической цепи и автоматическим отключением электроустановки. В другом случае блокировка дает возможность открыть двери ограждения электроустановки только после предварительного отключения источника высокого напряжения.

Часто блокировки применяют совместно со звуковыми или световыми сигнальными устройствами предупреждения о наличии напряжения на электроустановке. При **световой** сигнализации зеленый свет ламп показывает, что напряжение с установки снято, красный свет – что установка находится под опасным напряжением. К **звуковой** сигнализации относятся звонок и сирена, предупреждающие работающих о появлении напряжения на установке.

Блокировка выполнена в виде отдельного блока управления камерой, к которому подключаются контакты цепи питания, контакты дверей, кнопки управления и световая сигнализация.

Блокировочные контакты дверей включены в цепь управления высоковольтным источником напряжения. Блокировочные контакты при открывании двери размыкают цепь питания высоковольтного источника, и высокое напряжение отключается. Во избежание произвольного размыкания цепи двери снабжены затворами и рукояткой с затвором.

На рис. 3 представлена схема блока управления камерой (см. рис. 2).

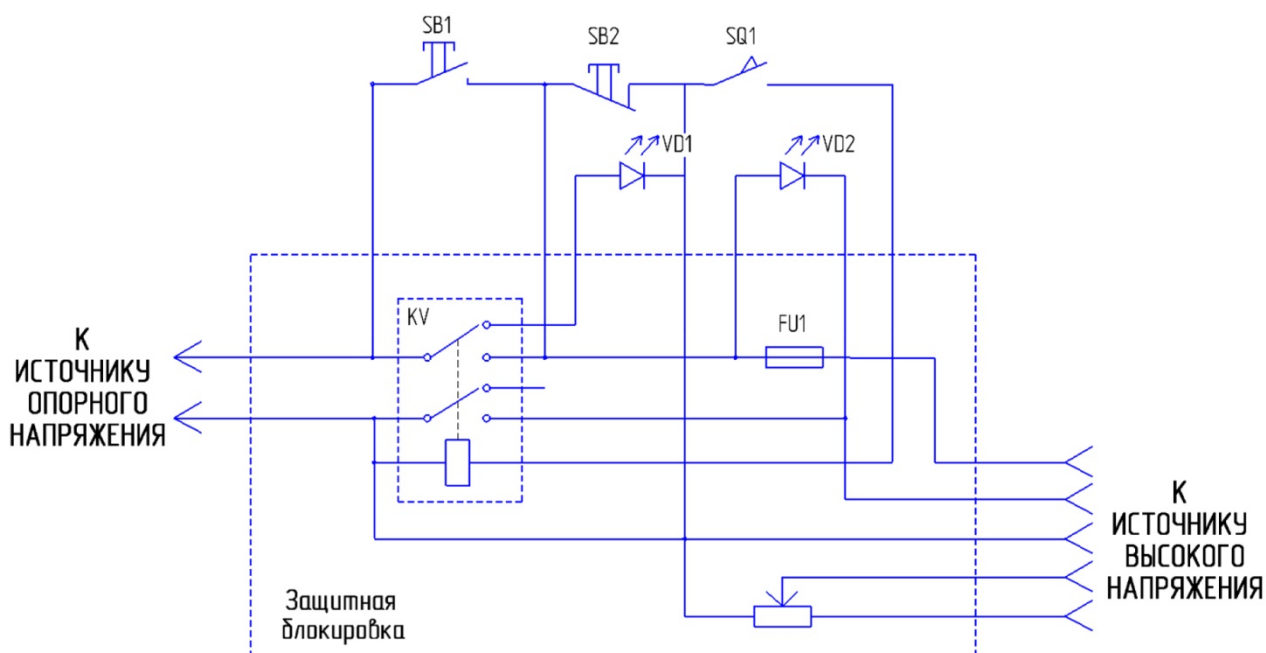


Рис. 3. Схема блока управления камерой

Защита от остаточных зарядов внутри ограждения

Остаточный заряд остается на определенное время на элементах цепей высокого напряжения, образующих емкость относительно «земли». Согласно ГОСТ Р 58698-2019 (МЭК 61140 2016) для выравнивания потенциала элемента с потенциалом «земли» должна использоваться специальная разрядная штанга, которая посредством гибкого провода заданного сечения крепится к контуру заземления¹. Штанга представляет собой диэлектрическую трубку, на одном конце которой расположена изолированная накладка для руки, а на другом – щуп, обеспечивающий контакт при прикосновении к токоведущим частям после отключения высокого напряжения².

После отключения напряжения и открытия двери камеры с помощью штанги путем касания свободного конца штанги к элементам высоковольтной цепи и другим предметам, находящимся в камере, производится выравнивание в экранированной камере потенциалов элементов электрической цепи относительно потенциала земли. Контакт обслуживающего персонала с высоковольтной частью системы запрещен без предварительного выравнивания потенциалов элементов относительно земли.

¹ ГОСТ Р 58698-2019 (МЭК 61140 2016) Защита от поражения электрическим током. Общие положения для электроустановок и электрооборудования.

² ГОСТ ИЕС 61140-2012 Защита от поражения электрическим током. Общие положения безопасности установок и оборудования (с поправкой).

Управление защитной экранированной камерой ИИС

Для управления экранированной камерой и получения информации о состоянии высокого напряжения установлена панель управления. Панель включает в себя кнопку «Вкл.», включающую питание источника высокого напряжения и кнопку аварийного выключения «Выкл.». Сигнальная лампа красного цвета сигнализирует о включении источника высокого напряжения, замкнутых контактах дверей и о подаче напряжения на рабочее поле. Сигнальная лампа зеленого цвета сигнализирует о подаче напряжения на пульт управления при отключенном источнике высокого напряжения и разомкнутых контактах дверей. В соответствии с ГОСТ 12.4.026-76 кнопка аварийного выключения имеет красный цвет. Все элементы панели управления и блокировочные контакты подключены к управляемому реле. Блок управления камерой показан на рис. 4.

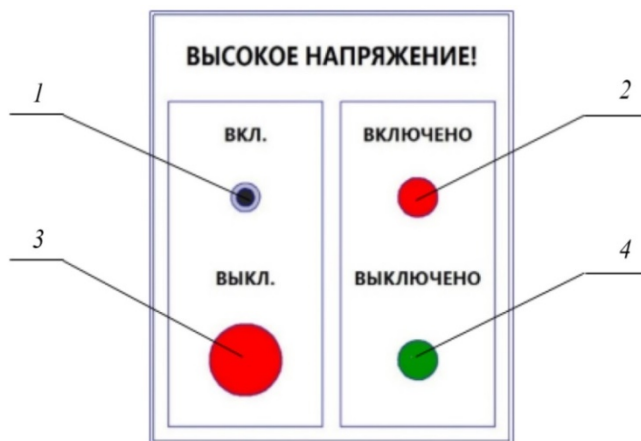


Рис. 4. Блок управления камерой:

1 – кнопка включения питания источника высокого напряжения;
2 – красная сигнальная лампа; 3 – кнопка аварийного выключения; 4 – зеленая сигнальная лампа

Перед включением высокого напряжения в измерительной камере убедиться, что источник высокого напряжения, образцовый и контролируемый ДНВ заземлены и подключены к токоведущей шине, а блокировочные контакты дверей замкнуты. При этом **на лицевой панели блока управления** сигнальная лампа зеленого цвета указывает, что напряжение с установки снято. Кнопкой «Вкл.» включается питание высоковольтного источника. При этом на лицевой панели блока управления включится сигнальная лампа красного цвета, сигнализирующая о наличии высокого напряжения в камере¹.

Срабатывание защиты происходит при размыкании цепи путем открытия двери, нажатия кнопки аварийного отключения, а также включения блокировки источника высокого напряжения.

Система не может быть включена после срабатывания защиты, так как цепь будет полностью разомкнута благодаря установленному реле (см. рис. 3). Для включения необходимо повторно замкнуть цепь защиты, нажав кнопку «Вкл.».

Для автоматического управления подключить ИИС к ПК. В ПО управления задать параметры измерения и управляющие напряжения для источника высокого напряжения. При необходимости включить автозапуск следующего управляющего напряжения. Для включения высокого напряжения в окне «управление измерением» нажать кнопку «ЗАПУСТИТЬ»². Для отключения высокого напряжения в ПО рядом расположена кнопка «ОСТАНОВИТЬ»³.

В случае превышения максимального значения управляющего напряжения в первой контрольной точке ПО не включит высокое напряжение и выдаст информационное сообщение об ошибке. В процессе работы, при превышении управляющего напряжения в конкретной контрольной точке, программа производит отключение высокого напряжения и системы в целом. Для повторного запуска необходимо заново повторить все операции в ПО управления ИИС.

¹ ГОСТ 12.3.019-80 Система стандартов безопасности труда. Испытания и измерения электрические. Общие требования безопасности.

² ГОСТ 12.4.026-76 Цвета сигнальные и знаки безопасности.

³ ГОСТ 12.1.030-81 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Защитное заземление. Зануление (с изменением N 1).

Заключение

В ходе работы были рассмотрены технические средства защиты ИИС для поверки киловольтметров.

Реализованы технические средства защиты ИИС, позволяющие обеспечить: надежность работы, ограничение доступа обслуживающего персонала к высоковольтной части, безопасную работу после снятия высокого напряжения, контроль и управление установкой.

Разработанная комплексная защита установки для поверки киловольтметров УПК-30ПТ обеспечивает надежность работы при возникновении электрических пробоев изоляции и защиту персонала от поражения электрическим током.

Список литературы

1. Правила устройства электроустановок. М. : Кнорус, 2015.
2. Ильин А. С., Кострикина И. А., Воронов А. П. Установка для поверки киловольтметров УПК-30ПТ // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2020. № 4. С. 44–50. doi: 10.21685/2307-5538-2020-4-5
3. Ильин А. С., Юрков Н. К., Баннов В. Я. [и др.]. Алгоритм работы установки для поверки киловольтметров УПК-30ПТ // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2020. Т. 2. С. 303–305.
4. Инструкция по эксплуатации оперативных блокировок безопасности в распределительных устройствах высокого напряжения РД 34.35.512 / сост. Б. С. Гельман. М., 1979.
5. Средства защиты в электроустановках. URL: <https://www.grandars.ru/shkola/bezopasnost-zhiznedeyatelnosti/zashchita-elektrostanovok.html>
6. Высоковольтные источники питания. URL: <https://www.spellmanhv.com>

References

1. *Pravila ustroystva elektroustanovok* = Rules for the installation of electrical installations. Moscow: Knorus, 2015. (In Russ.)
2. Il'in A.S., Kostrikina I.A., Voronov A.P. Installation for verification of kilovoltmeters UPK-30PT. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* = Measurement. Monitoring. Management. Control. 2020;(4) 44–50. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2020-4-5
3. Il'in A.S., Yurkov N.K., Bannov V.Ya. [et al.]. The algorithm of the installation for checking kilovoltmeters UPK-30PT. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality. 2020;2:303–305. (In Russ.)
4. Gel'man B.S. (comp.). *Instruktsiya po ekspluatatsii operativnykh blokirovok bezopasnosti v raspredelitel'nykh ustroystvakh vysokogo napryazheniya RD 34.35.512* = Operating instructions for operational safety locks in high-voltage switchgears RD 34.35.512. Moscow, 1979. (In Russ.)
5. *Sredstva zashchity v elektroustanovkakh* = Protective equipment in electrical installations. (In Russ.). Available at: <https://www.grandars.ru/shkola/bezopasnost-zhiznedeyatelnosti/zashchita-elektrostanovok.html>
6. *Vysokovol'tnye istochniki pitaniya* = High-voltage power supplies. (In Russ.). Available at: <https://www.spellmanhv.com>

Информация об авторах / Information about the authors

Алексей Сергеевич Ильин

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40);
инженер-электроник,
Научно-исследовательский институт
электронно-механических приборов
(Россия, г. Пенза, ул. Каракозова, 44)
E-mail: aalexeiil@mail.ru

Alexey S. Ilin

postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia);
electronics engineer,
Scientific and Research Institute
of Electronic Mechanic Instruments
(44 Karakozova street, Penza, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 14.04.2021

Поступила после рецензирования/Revised 25.04.2021

Принята к публикации/Accepted 30.04.2021

COMPUTER-AIDED DESIGN OF THE VIVALDI ANTENNA FOR ULTRA-WIDEBAND ELECTROMAGNETIC PULSE RADIATION

A.I. Mel'nychuk¹, N.V. Goryachev², N.K. Yurkov³

¹ Aviation Base of the Krasnodar Higher Military Aviation School of Pilots
of Russian Ministry of Defense, Rtishchevo, Russia

^{2,3} Penza State University, Penza, Russia

¹ pelmenio@mail.ru, ² ra4foc@yandex.ru, ³ yurkov_NK@mail.ru

Abstract. *Background.* Unmanned and remotely piloted aerial vehicles (UAVs and RPVs, respectively) have already found wide application in various areas of human life. *Materials and methods.* UAVs are actively used in agriculture, monitoring, logistics, control of hazardous objects. But, as often happens with technological progress, advanced developments are beginning to be actively used for military purposes. And today UAVs, including small ones, have become a real threat, not only to the military, but also to civilians. The purpose of this work is to substantiate the methods and means of countering strike UAVs, as well as to assess the damaging capabilities of the ammunition with the choice of the shape, mass and material of the striking elements. *Results and conclusions.* The concept of a universal ammunition capable of providing a prompt response to air threats to equipment and personnel emanating from unmanned aerial vehicles has been proposed and substantiated.

Keywords: drone, countermeasures, functional suppression, unmanned, apparatus, electromagnetic weapons

For citation: Mel'nychuk A.I., Goryachev N.V., Yurkov N.K. Computer-aided design of the Vivaldi antenna for ultra-wideband electromagnetic pulse radiation. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2021;2:78–91. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2021-2-8

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ АНТЕННЫ ВИВАЛЬДИ ДЛЯ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИМПУЛЬСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

А. И. Мельничук¹, Н. В. Горячев², Н. К. Юрков³

¹ Учебная авиационная база Краснодарского высшего военного
авиационного училища летчиков МО РФ, Ртищево, Россия

^{2,3} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹ pelmenio@mail.ru, ² ra4foc@yandex.ru, ³ yurkov_NK@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Беспилотные и дистанционно пилотируемые летательные аппараты (БПЛА и ДПЛА соответственно) уже сегодня нашли широкое применение в различных областях жизнедеятельности человека. *Материалы и методы.* БПЛА активно используются в сельском хозяйстве, мониторинге, логистике, контроле за опасными объектами. Но как часто бывает при техническом прогрессе передовые разработки начинают активно применяться в военных целях. И сегодня БПЛА, в том числе малые, стали реальной угрозой, не только для военных, но и для мирных граждан. Целью данной работы является обоснование способов и средств противодействия ударным БПЛА, а также оценка поражающей возможности боеприпаса с выбором формы, массы и материала поражающих элементов. *Результаты и выводы.* Предложена и обоснована концепция универсального боеприпаса, способного обеспечить оперативный ответ на воздушные угрозы техники и личного состава, исходящие от беспилотных летательных аппаратов.

Ключевые слова: дрон, противодействие, функциональное подавление, беспилотный, аппарат, электро-магнитное оружие.

Для цитирования: Мельничук А. И., Горячев Н. В., Юрков Н. К. Автоматизированное проектирование антенны Вивальди для сверхширокополосного электромагнитного импульсного излучения // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 2. С. 78–91. doi:10.21685/2307-4205-2021-2-8

Introduction

A technology for functional suppression of unmanned aerial vehicles (UAV) suggests using short-wave (fractions to tens of nanoseconds) electromagnetic radiation (EMR). There are two possible options for such EMR effect on electronic equipment, namely, in-band or out-of-band [6, 7].

Out-of-band functional suppression provides for the impact of radio electronic means (REM) on receivers at any frequencies outside their bandwidth, and does not require initial data on operating frequency range.

In-band functional suppression techniques provide for EMR energy losses when passing through the input circuitry of REM receiver, and depending on the ratio between the bandwidth of the reception path, and the EMR spectrum width. In-band methods are energetically most favorable, but they require initial data on technical characteristics of microwave radiation effect on UAV, and attacked or suppressed REM (e.g., the operating frequency and bandwidth of receiving devices; the clock frequency of special calculators and computers; the resonant frequency of fastener designs of radio circuit board components, etc.).

There are three fundamentally different areas for the implementation of functional suppression means using powerful short-wave EMR, and the third one being mostly widespread [1]:

1. Spark-gap and semiconductor video pulse generators.
2. Relativistic microwave radio pulse oscillators.
3. Transmitting multi-position radiation systems (MRS) and phased arrays with controlled EMR microwave focusing.

Here are the effects of ultra-short microwave radio pulses:

1. Interference: the radiation source creates electromagnetic field intensity in the operating frequency range of the target receiver. This intensity is the same or greater than the useful signal, since the receiver is unable to extract the useful signal.
 2. False information: an induced electromagnetic signal sends false information into the receiver.
 3. Transient destabilization: the induced voltage affects the logic state of an electronic component.
 4. Permanent damage: semiconductor junctions are exposed to overvoltage, leading to their failure.
- However, this is due to the presence of an effective antenna system capable of transmitting power of ultra-short microwave pulses without losses [2].

Since the problem of ultra-wide range microwave radiation is associated with designing the device, it is advisable to consider an antenna operating in a wide frequency band. To create an antenna-feeder device, it is proposed to view a tapered slot antenna (TSA), which meets the requirements for creating a device for functional suppression of UAV systems by emitting an ultra-wideband and ultra-short electromagnetic pulse.

TSA, also called Vivaldi antennas (radiators based on symmetrical slot lines), possess important technical characteristics: 1) small overall dimensions; 2) small radiator weight; 3) the required radiation pattern over the entire range of operating frequencies; 4) the ability to emit ultra-short pulses.

Along with stated requirements, it is necessary to note a simple design of this type of radiators, and the ability to work in a wide range of frequencies. Based on these, it is advisable to calculate and consider such radiator for further modeling, and testing.

When calculating, the operating bandwidth mostly depends on the selected frequency, generally degrading the output matching, and on the change in the maximum of radiation pattern, beam expansion, and other parameters.

The operating bandwidth of wideband antennas should be 10 to 50% of the nominal frequency. A Vivaldi antenna is a broadband antenna, considered as a radiator of ultra-short pulses in a number of works. It should be noted that we have selected the operating frequency of 8 GHz for further calculations, as the frequency range from 5 to 8 GHz negatively affects electronic radio-elements [3].

Initially, it is appropriate to consider such radiator as an irregular transmission line harmonizing a regular line with free space. It is necessary to minimize the reflection coefficient at the input of the matching device, wherein the wave impedance and the transition length change. Thus, proper frequency characteristics (T -waves and quasi T -waves propagating in slot lines) are satisfied.

For a more accurate determination of characteristics, different calculation methods for the field along the entire slot antenna are used. A stepwise approximation by sections representing segments of a constant

width slot is applied to an expansion slot according to an exponential law. This technique presents an approximate, but more accurate calculation method. For such sections, the field distribution obtained by the Galerkin method in the spectral domain is used. Thus, the field of the entire slot antenna can be defined as the sum of fields of each section.

According to this method, the field of a slot antenna with the obtained amplitude field distribution in the slot is determined. Based thereon, it is possible to consider the dielectric substrate (given a printed circuit board antenna), and the wave diffraction at the edges of an infinite height radiator.

These methods are cumbersome and inconvenient. For an approximate engineering calculation and electrodynamic modeling, software packages for calculating various types of antennas are quite suitable. For an approximate antenna calculation and simulation, it is advisable to use the CST Microwave Studio and HFSS Microwave Office computer-aided design (CAD) systems, since the theory of Vivaldi antennas is rather complicated in the field of electrodynamics (it is a traveling wave antenna). As a rule, antenna parameters are selected empirically. For further modeling of the Vivaldi antenna, it is appropriate to use the HFSS tool [4].

Approximate calculation and optimization in the CAD system

The calculation of the actual antenna length is carried out as follows:

$$L = L_{eff} - 2\Delta L,$$

$$W_{Total} = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\frac{(\epsilon_r + 1)}{2}}},$$

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[\frac{1}{\sqrt{1 + 12 \left(\frac{h}{W} \right)}} \right],$$

$$L_{Total} = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\epsilon_{eff}}} - 0,824 \frac{(\epsilon_{eff} + 0,3) \left(\frac{W}{h} + 0,264 \right)}{(\epsilon_{eff} - 0,258) \left(\frac{W}{h} + 0,8 \right)}.$$

The aperture geometry is calculated according to the formulas:

$$W_{max} = \frac{c}{2f_{min} \sqrt{\epsilon_r}},$$

$$W_{min} = \frac{c}{2f_{max} \sqrt{\epsilon_r}}.$$

where c is the speed of an electromagnetic wave propagating in a vacuum; f_{min} is the minimum operating frequency; f_{max} is the maximum operating frequency; ϵ_r is the permittivity.

The antenna slot width is determined by [5]:

$$W(x) = W_0 \exp \left[\ln(W_L) \left(\frac{x}{L} \right)^\alpha \right] - (W_0 + b).$$

where W_0 is the antenna length; W_L is the total antenna width; b is the minimum aperture value of the taper; $\alpha = 0.7$.

A screenshot of this calculation results is given in Fig. 1.

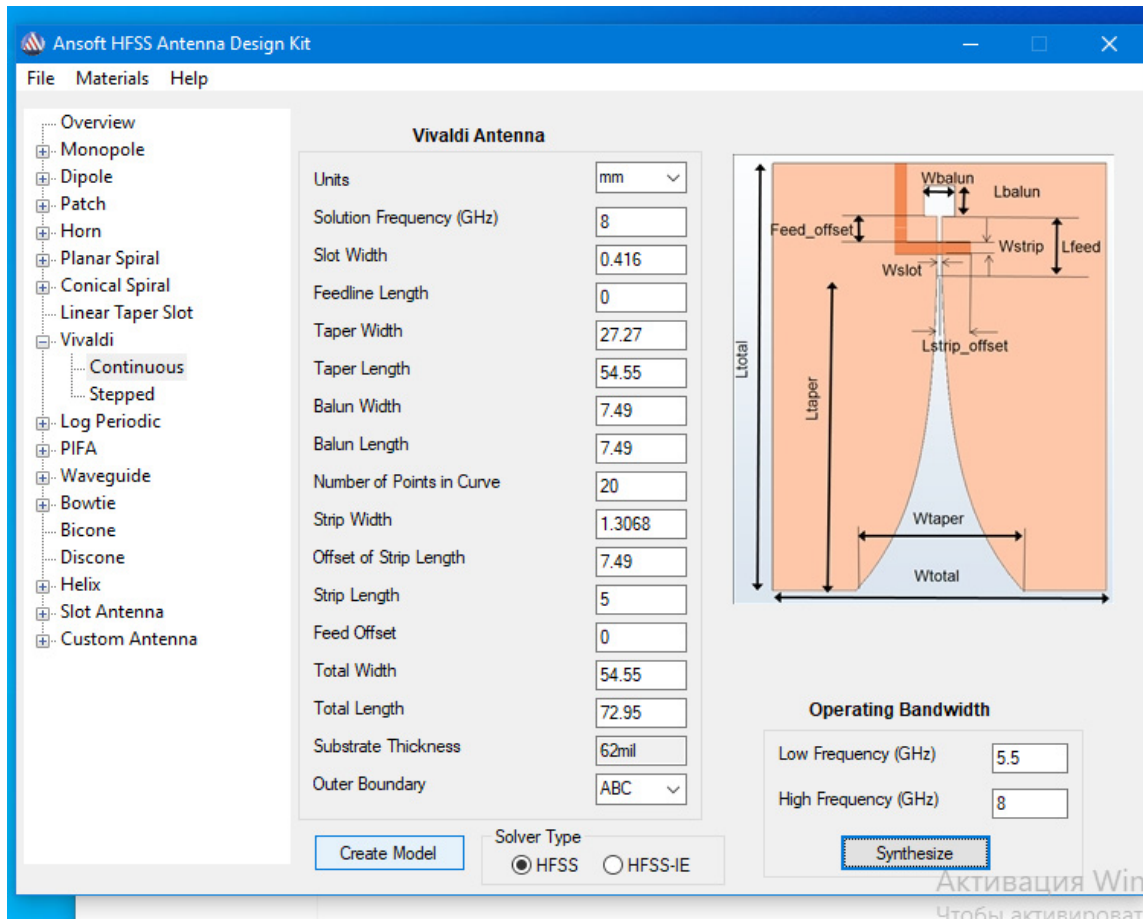


Fig. 1. Calculation program screenshot (geometric dimensioning obtained by approximate calculation)

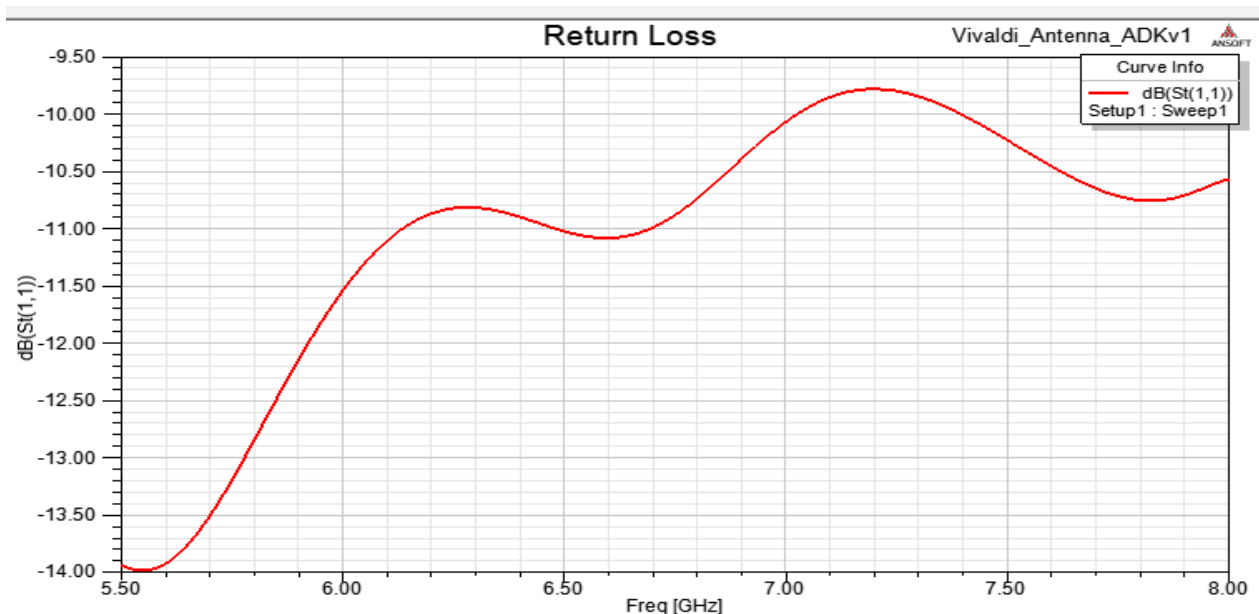


Fig. 2. Reflection coefficient versus frequency

As seen from the graph (Fig.2), the reflection coefficient is -10.5 dB at 8 GHz, being rather low. A good result is achieved from -20 dB, and it increases from 6 GHz [6].

It is necessary to perform antenna optimization (length, width, and size of the initial aperture) for its further consideration, wherein weight and size parameters should not go beyond the desired results.

First, we consider the effect of the initial aperture size W_{slot} on the reflection coefficient.

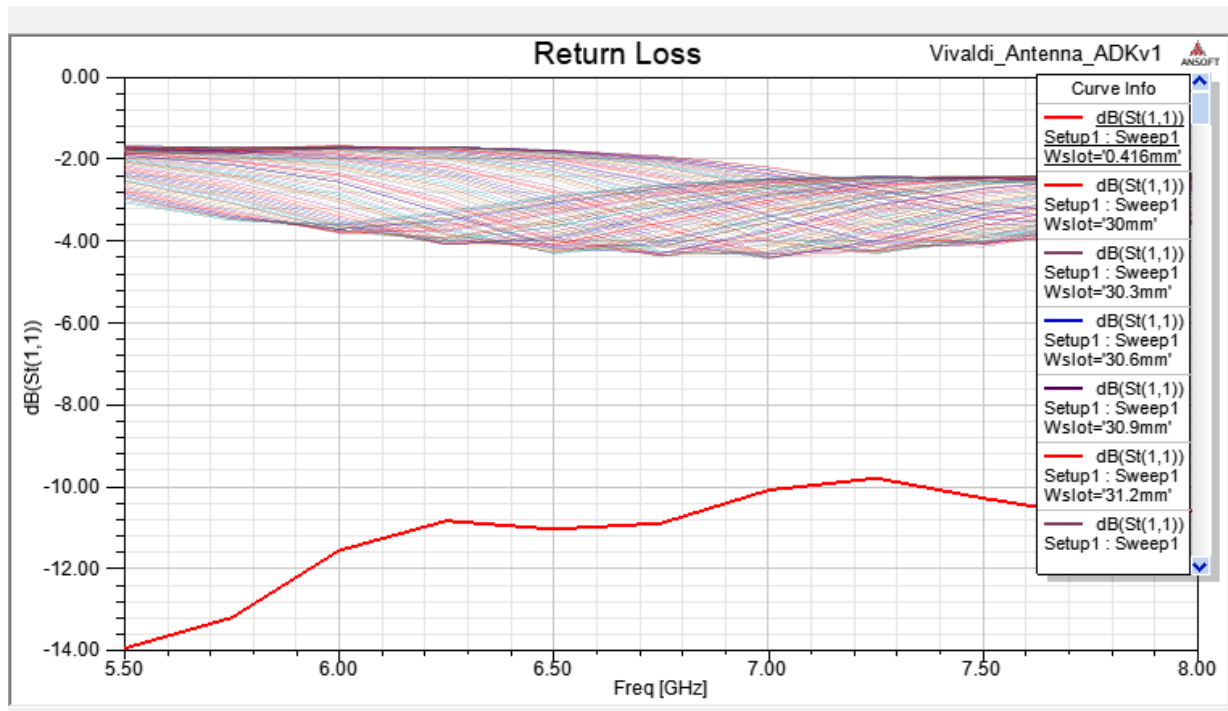


Fig. 3. Reflection coefficient optimization by varying the initial antenna aperture

As seen from the plot (Fig.3), the reflection coefficient increases with an increase in the indicator, being undesirable.

After unsuccessful optimization of the previous parameter, we have carried out optimization of the antenna length L_{total} (Fig. 4).

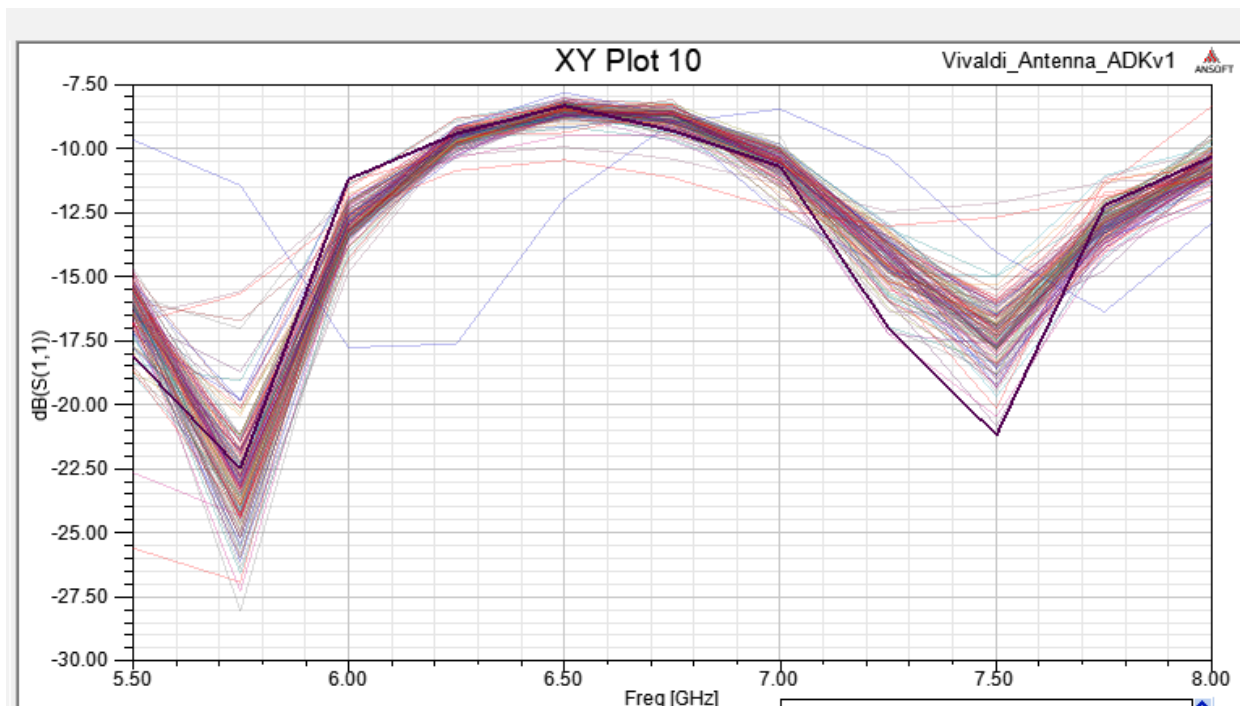


Fig. 4. Reflection coefficient optimization by varying the antenna length

In the above plot, one can distinguish a polygonal chain that meets the minimum requirements for the reflection coefficient. A genetic algorithm was chosen for the initial optimization.

It was found that the antenna length was 228.5 mm with the optimal coefficient, which satisfies the forthcoming operating conditions (Fig. 5).

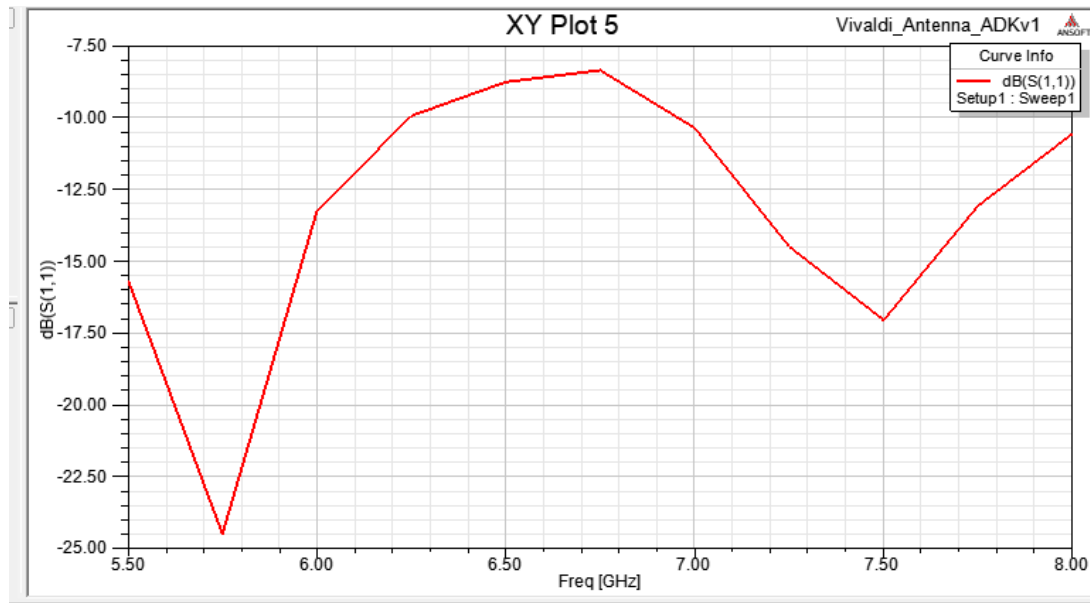


Fig. 5. Approximate optimization results in the CAD system

Thus, it was possible to reduce the reflection coefficient at a frequency of 5.7 GHz. Since the antenna is supposed to be of ultra-wideband, therefore, it is advisable to carry out further optimization so that the reflection coefficient should become acceptable at other frequencies [7].

As can be seen from the optimization plots, the reflection coefficient decreases as the width of antenna reduces. Considering this, a polygonal chain of 39.5 mm was chosen. The graph shows a more acceptable size in the 5.6 GHz domain, wherein it does not meet the specified characteristics in the 7.5 GHz domain.

Thus, the geometric dimensioning has changed after optimization (Fig.6).

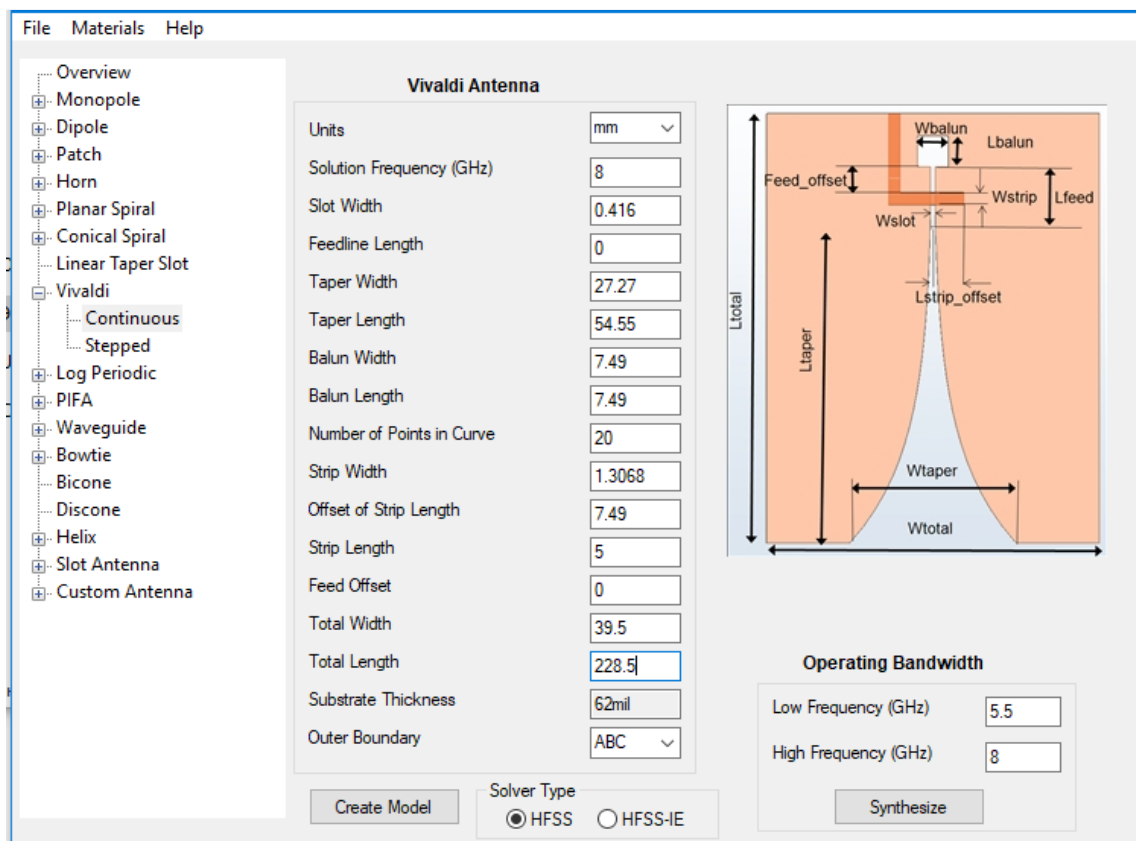


Fig. 6. The obtained antenna geometric dimensioning after optimization

Verification of the obtained results when simulating the antenna

Consider the following plot to verify the obtained antenna geometry (Fig. 7) [8].

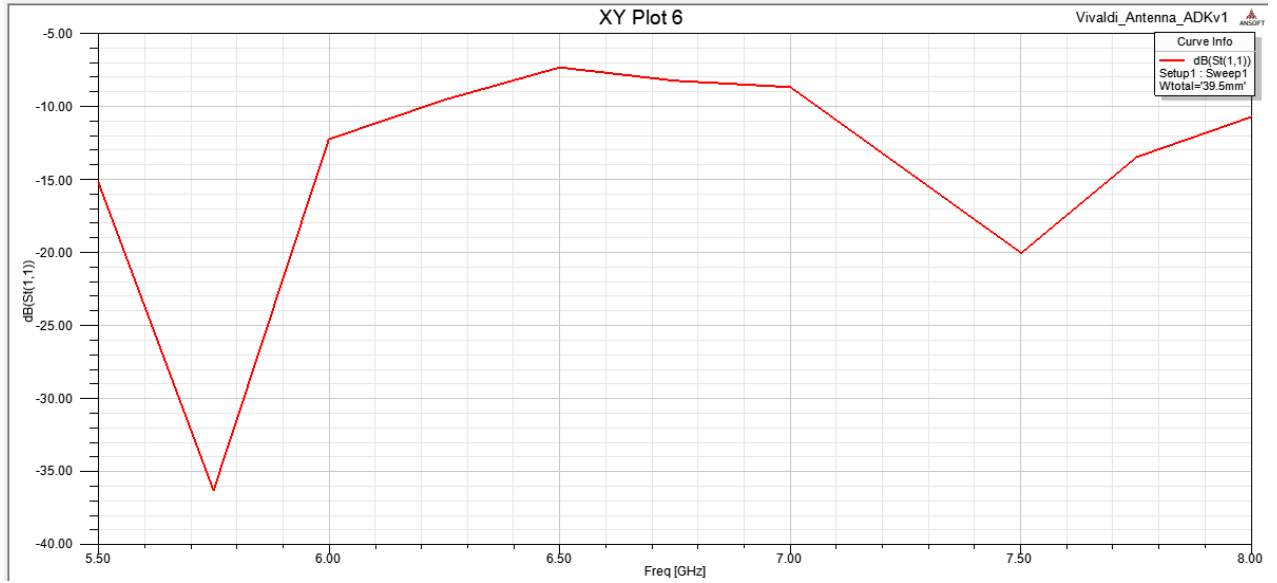


Fig. 7. Reflection coefficient of an optimized antenna simulation

A shift in $S(1,1)$ was caused by a change in active and reactive resistance. The antenna gain was modified due to an increase in the antenna geometry parameters L_{total} .

As seen from the plot (Fig. 7), the minima values are achieved at 5.6 GHz and 7.5 GHz. The indicated frequencies lie in the range of desired ones, which are negatively affect radio-electronic devices.

To construct the radiation pattern, the following formulas are used in the H -plane ($\varphi = 0$):

$$F_{\varphi}(\theta) = \frac{2 \cos \theta}{\sqrt{\cos^2 \theta + (\xi \operatorname{ctg} \xi k_0 d)^2}} \cdot \left(\frac{\sin(0,5 k_0 \cdot a \sin \theta)}{0,5 k_0 \cdot a \sin \theta} \right),$$

and in the E -plane ($\varphi = \pi/2$):

$$F_{\varphi}(\theta) = \frac{2 \xi \cos \theta \cdot \cos(0,5 k_0 b \sin \theta)}{\sqrt{\xi^2 + (\epsilon \mu \cos \theta \cdot \operatorname{ctg} \xi k_0 d)^2} \cdot \left(1 - \left(k_0 \frac{b}{\pi} \sin \theta \right)^2 \right)},$$

where d is the thickness; a is the width; b is the length; $k = \beta/\epsilon\mu$; β is the propagation constant; ϵ is the permittivity; μ is the permeability; $\xi = \sqrt{\epsilon\mu - \sin^2 \theta}$.

The directivity is defined as follows:

$$D = \frac{4\pi U}{P_{rad}},$$

where U is the radiation intensity; P_{rad} is the radiation power.

The intense radiation power is calculated by:

$$U(\theta, \varphi) = \frac{|E|^2}{\eta_0} r^2,$$

where $|E|$ is the E -plane module; r is the distance from the antenna; η is the impedance of free space being 376.7 dB.

3D visualization of the radiation pattern is presented in Fig. 8 [9].

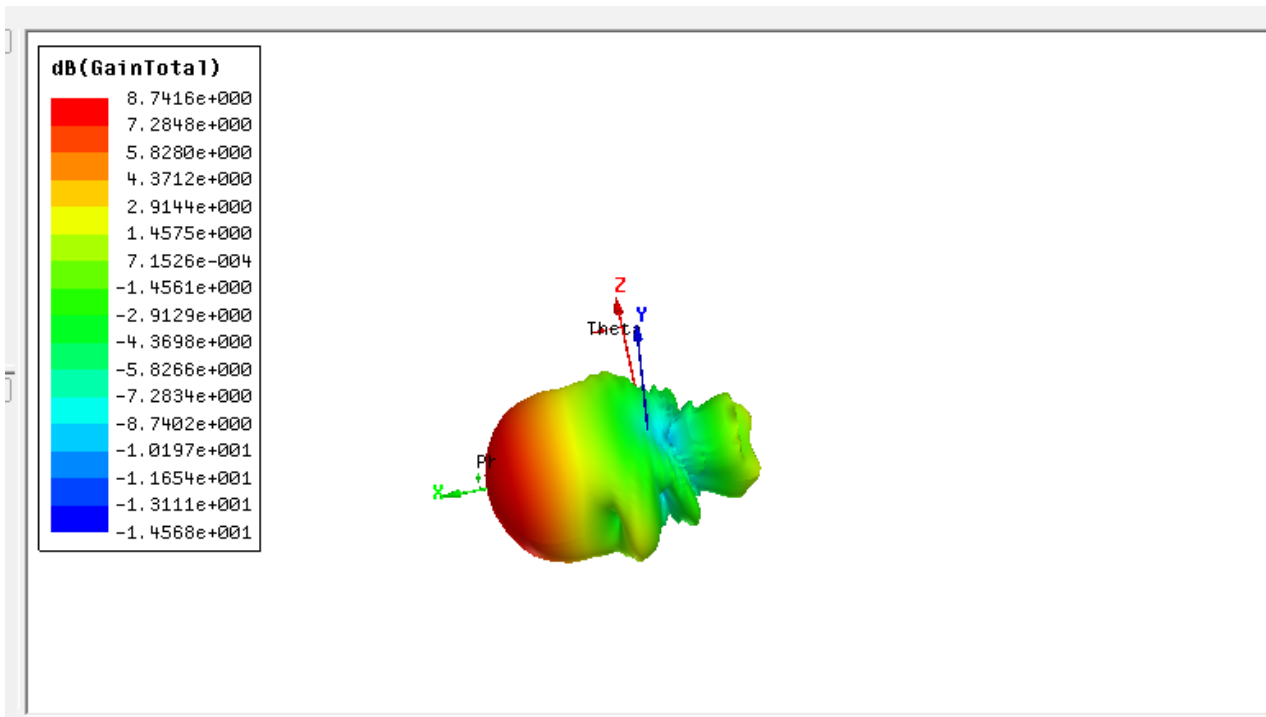


Fig. 8. Three-dimensional radiation pattern

Based on the results, the radiation pattern is wide enough, and the maximum gain is 8.7 dB for the area marked in red.

2D visualization of the radiation pattern is presented in Fig. 9.

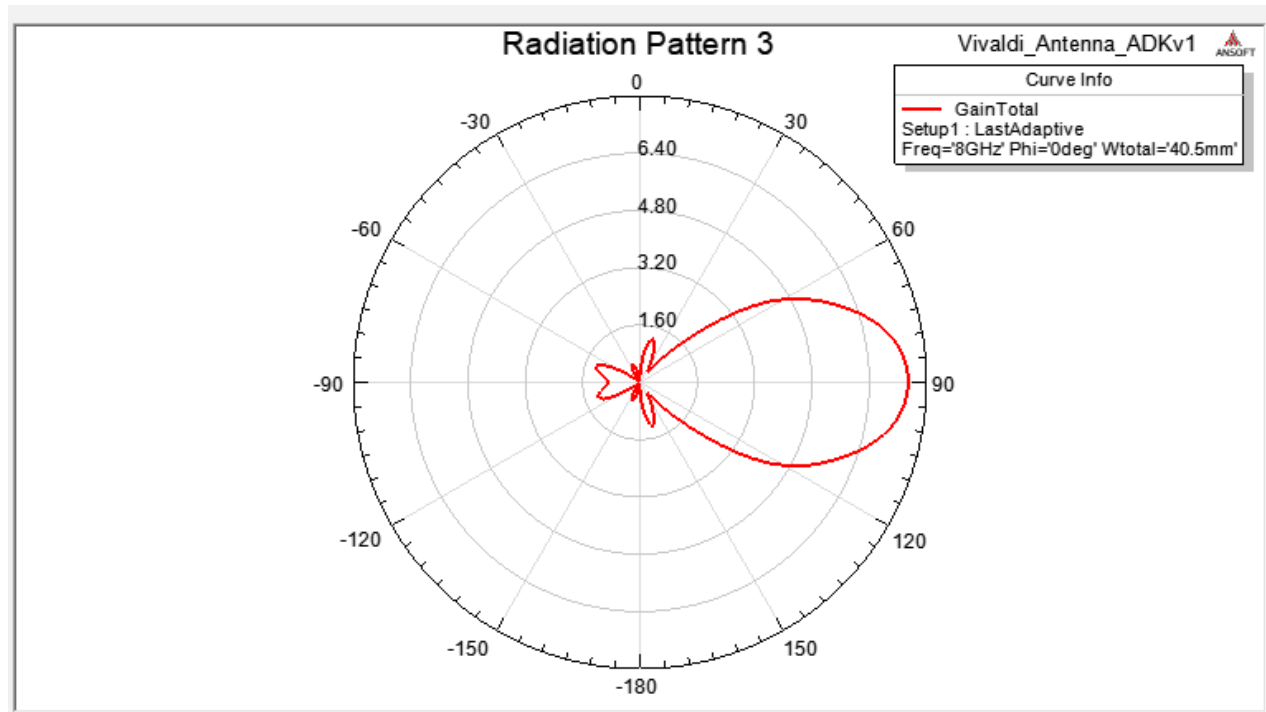
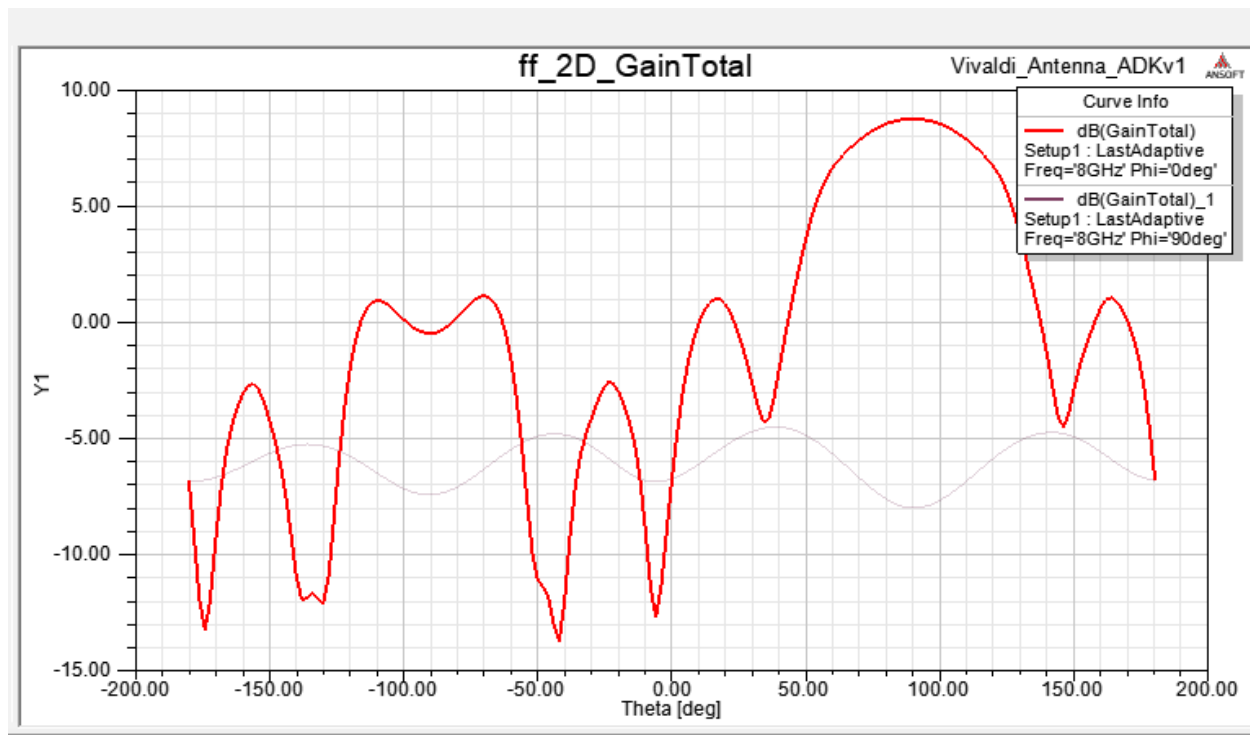


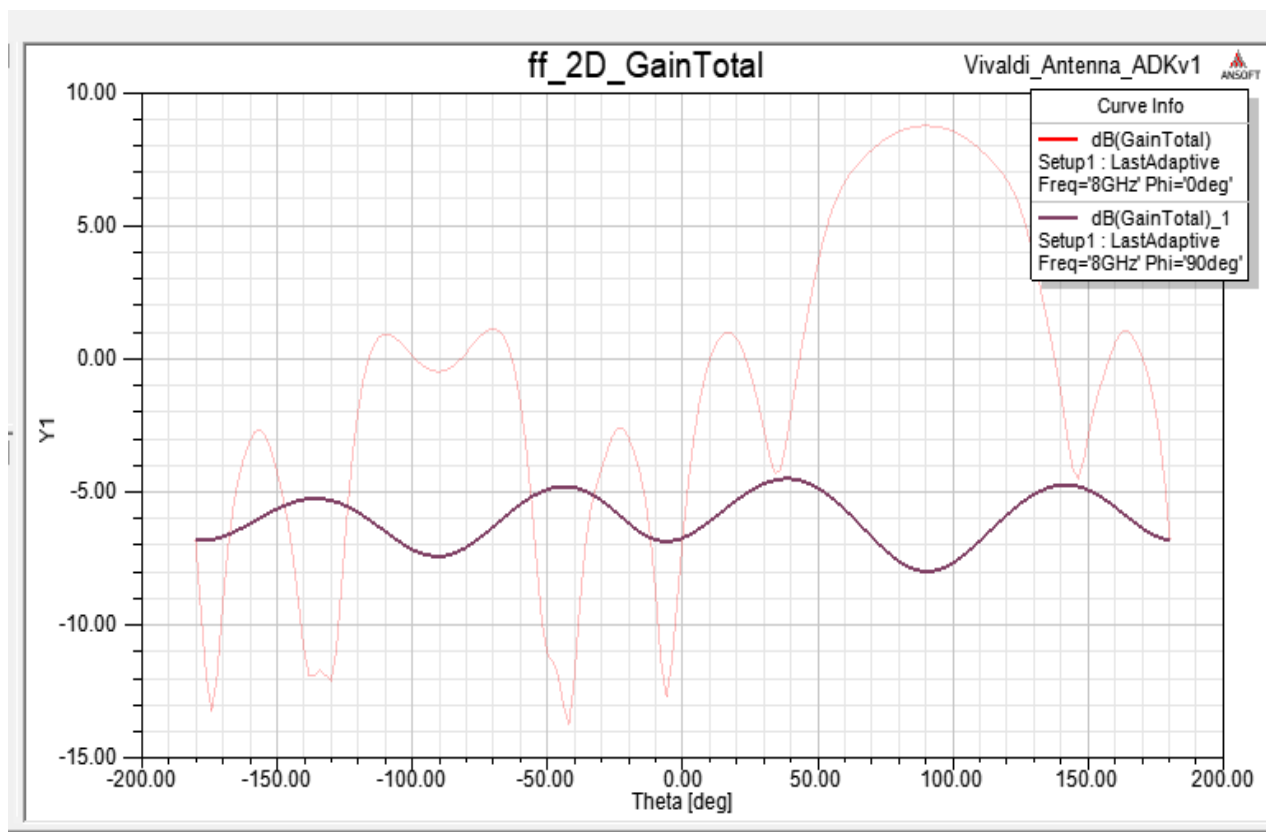
Fig. 9. Two-dimensional radiation pattern

It follows from the plot of polar coordinates that half power beamwidth (HPBW) corresponds to 60 degrees, being rather high. The side-lobe level is very low, being less than 13%.

Polarization plots in the *E*-plane and the *H*-plane are presented in Fig.10 and Fig. 11, respectively.

Fig. 10. Plot of polarization in the E -plane

The plot follows the radiation pattern in polar coordinate system, but it is presented in a rectangular shape for convenience. The main lobe gain is 8.7 dB [10].

Fig. 11. Plot of polarization in the H -plane

The Smith chart is presented in Fig. 12.

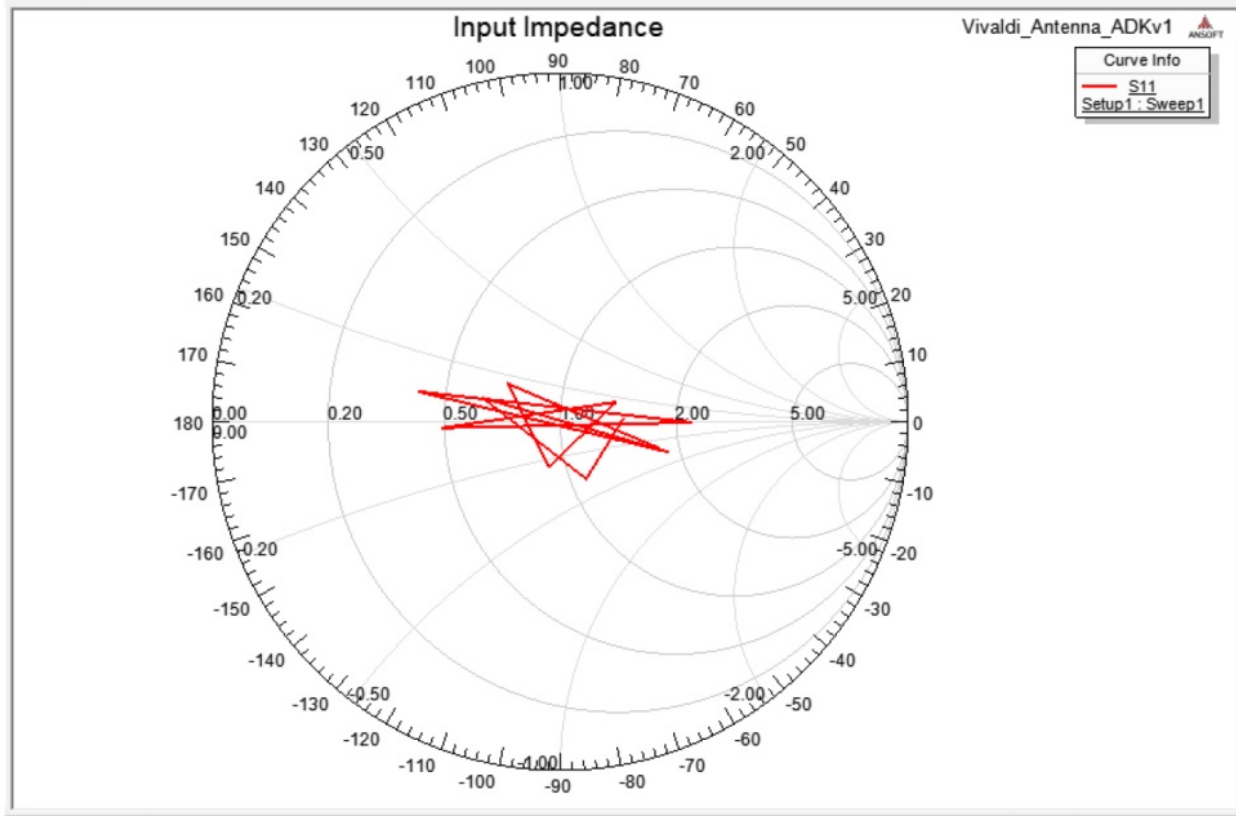


Fig. 12. The Smith chart

Simulation of antenna radiation patterns in the E -plane is shown in Fig. 13 and Fig. 14 [11, 12].

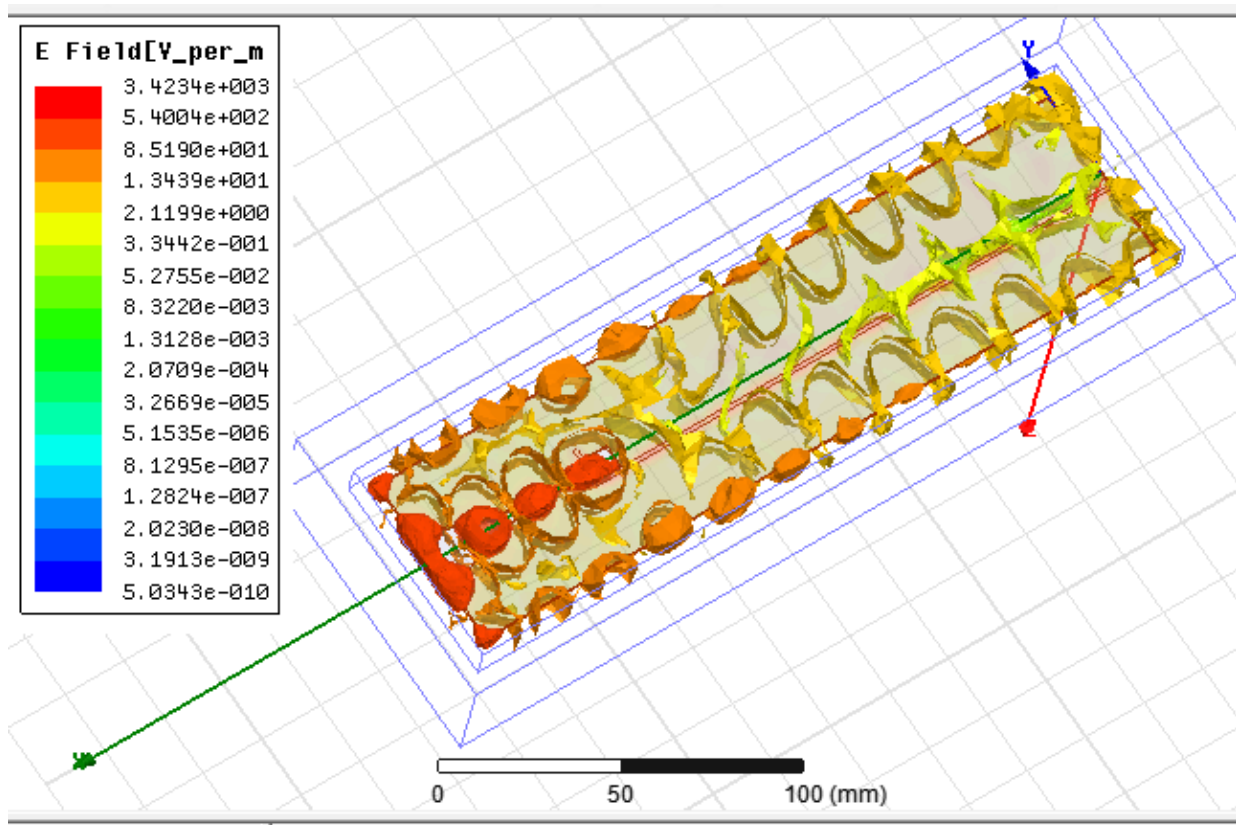


Fig. 13. Antenna radiation pattern in the E -plane

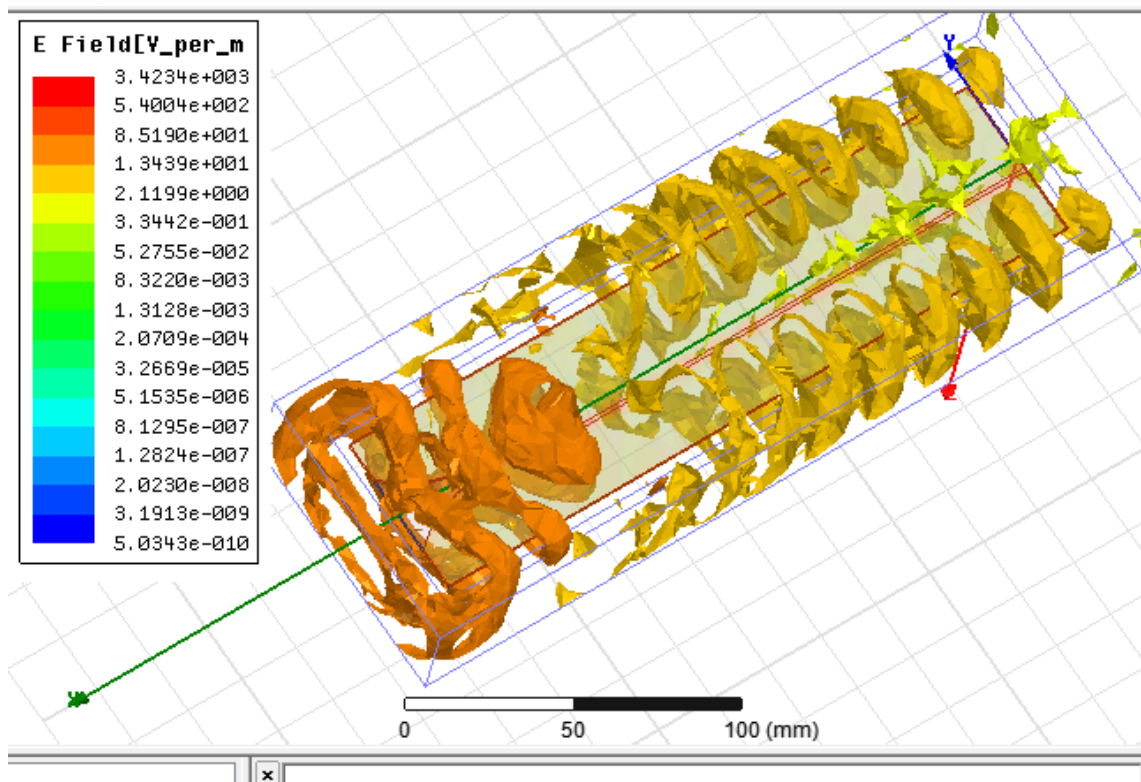


Fig. 14. Antenna radiation pattern in the *E*-plane

As shown in the above simulation screenshot in the *E*-plane, there is a strong radiation of electromagnetic field, marked in orange and yellow [13, 14].

A similar picture is observed in the *H*-plane radiation pattern shown in Fig. 15 [15, 16].

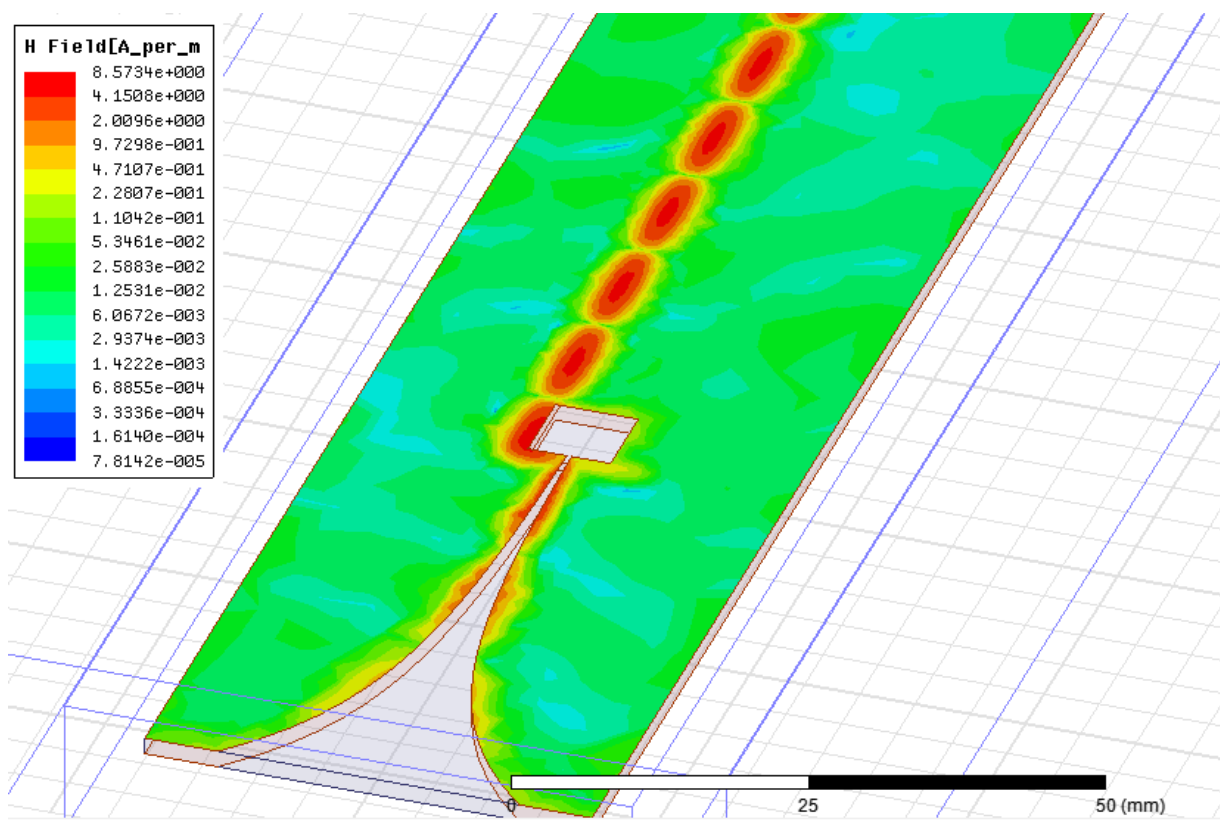


Fig. 15. Antenna radiation pattern in the *H*-plane

Conclusion

Using the finite element method, it was possible to analyze the results, calculations, and simulation of the Vivaldi antenna. Having used a genetic algorithm for optimizing the resulting Vivaldi antenna (due to changing geometric dimensioning), we have managed to achieve the acceptable characteristics of a radiator. Based on practical experience, a simplified idealized model considering mutual influence of electronic radio-elements and characteristics of filters and coils would be sufficient [17].

Based on the obtained results, one can judge the relevance of using such types of antennas in the radiation of ultra-wideband systems. Construction of a phased array based on the Vivaldi antenna, emitting in the indicated range, would be interesting from an engineering point of view [18, 19].

References

1. Gross F.B. *Frontiers in Antennas: Next Generation Design & Engineering*, 1st ed. McGraw-Hill Companies, 2011.
2. Bobreshov A.M., Meshcheryakov I.I., Uskov G.K. Modeling generator of ultrashort pulses with the Vivaldi antenna. *Proceedings of Voronezh State University. Ser.: Systems analysis and information technologies*. 2014;3:81–85
3. Voskresensky D.I. *Microwave Devices and Antennas. Phased Array Design*. Moscow: Radiotekhnika, 2012.
4. Mitelman Yu.E. *Design of Antenna Systems in Ansoft HFSS*. Yekaterinburg: Ural Federal University, 2012.
5. Chernyshev S.L., Vilensky A.R. Development of radiators for ultra-short-pulse antenna arrays. *XVII International Scientific and Technical Conference on Radiolocation, Navigation, Communications (RLNC-2011) (Voronezh, 12–14 April, 2011)*. Voronezh, 2011:2159–2170.
6. Patent RU2700206C1. *Method of two-factor functional suppression of unmanned aerial vehicle*. Yurkov N.K., Goryachev N.V., Kuzina E.A. Sept. 13, 2019, bull. No. 26.
7. Patent RU2700207C1. *Method for functional suppression of an unmanned aerial vehicle*. Yurkov N.K., Goryachev N.V., Kuzina E.A. Sept. 13, 2019, bull. No. 26.
8. Soghomonyan K.E., Yurkov N.K. Effects of ultra-short pulses of electromagnetic radiation on unmanned aerial vehicles. *Proceedings of the International Symposium on Reliability and Quality*. 2019;2:315–317.
9. Melnichuk A.I., Goryachev N.V., Yurkov N.K. Ways and means of countering an unmanned aerial vehicle. *Reliability & Quality of Complex Systems*. 2020;4(32):131–138. doi: 10.21685/2307-4205-2020-4-14.
10. Grishko A.K. Optimal control of frequency resource in radio electronic systems on the basis of probability analysis of information conflict dynamics. *Vestnik of Ryazan State Radio Engineering University*. 2016;(57):21–28. doi: 10.21667/1995-4565-2016-57-3-21-28.
11. Grishko A.K., Goryachev N.V., Yurkov N.K. Analysis of mathematical models for calculating the fields of electro and range radar systems by sequential analysis. *Engineering Journal of Don*. 2015;2:16.
12. Andreev P.G., Yakimov A.N., Yurkov N.K. [et al.]. Methods of calculating the strength of electric component of electromagnetic field in difficult conditions. *International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE) (Saratov, Russia, Sept. 22–23, 2016)*. Saratov, 2016:1–7. doi: 10.1109/APEDE.2016.7878895.
13. Grishko A.K. Optimizing the placement elements of RES based multilevel geoinformation model. *Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series*. 2015;3(47):85–90.
14. Grishko A.K., Zhumabaeva A.S., Yurkov N.K. The electromagnetic resistance of electronic systems based on probabilistic analysis of the dynamics of the information conflict. *Measuring. Monitoring. Management. Control*. 2016;4(18):49–58.
15. Grishko A.K. Parameter control of radio-electronic systems based of analysis of information conflict. *13th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE) (Novosibirsk, Russia, Oct. 03–06, 2016)*. Novosibirsk, 2016:107–111. doi: 10.1109/APEIE.2016.7806423.
16. Grishko A., Goryachev N., Kochegarov I. [et al.]. Management of structural components complex electronic systems on the basis of adaptive model. *13th International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET) (Lviv, Ukraine, Feb. 23–26, 2016)*. Lviv, 2016:214–218. doi: 10.1109/TCSET.2016.7452017.
17. Grishko A.K., Goryachev N.V., Kochegarov I.I., Yurkov N.K. Dynamic analysis and optimization of parameter control of radio systems in conditions of interference. *International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON) (Moscow, Russia, May 12–14, 2016)*. Moscow, 2016:1–4. doi: 10.1109/SIBCON.2016.7491674.
18. Grigor'ev A.V., Grishko A.K., Goryachev N.V. [et al.]. Contactless three-component measurement of mirror antenna vibrations. *International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON) (Moscow, Russia, May 12–14, 2016)*. Moscow, 2016:1–5. doi: 10.1109/SIBCON.2016.7491673.
19. Grishko A., Goryachev N., Yurkov N. Adaptive control of functional elements of complex radio electronic systems. *Int. J. Appl. Eng. Res.* 2015;10(23):43842–43845.

Список литературы

1. Gross F. G. *Frontiers in Antennas: Next Generation Design & Engineering*. The McGraw-Hill Companies, 2011. 526 p.
2. Бобрешов А. М., Мещеряков И. И., Усков Г. К. Моделирование генератора сверхкоротких импульсов совместно с антенной Вивальди // *Вестник Воронежского государственного университета. Сер.: Системный анализ и информационные технологии*. 2014. № 3. С. 81–85.
3. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток / под ред. Д. И. Воскресенского. М.: Радиотехника, 2012. 744 с.
4. Мительман Ю. Е. Проектирование антенных систем в ansoft hfss. Екатеринбург, 2012.
5. Чернышев С. Л., Виленский А. Р. Разработка излучателей для сверхкороткоимпульсных антенных решеток // *Радиолокация. Навигация. Связь: докл. XVII Междунар. науч.-техн. конф. Воронеж, 2011. С. 2159–2170.*
6. Патент 2700206 Российская Федерация, В64С 99/00(2019.09) H04К 3/00(2019.09) F41H 13/00(2019.09). Способ двухфакторного функционального подавления беспилотного летательного аппарата / Н. К. Юрков, Н. В. Горячев, Е. А. Кузина. № 2018114720; заявл. 20.04.2018; опубл. 13.09.2019, Бюл. № 26.
7. Патент 2700207 Российская Федерация, МПК В64С 99/00(2019.09) H04К 3/00(2019.09) F41H 13/00(2019.09) F42В 12/36(2019.09). Способ функционального подавления беспилотного летательного аппарата / Н. К. Юрков, Н. В. Горячев, Е. А. Кузина. № 2018142886; заявл. 05.12.2018; опубл. 13.09.2019, Бюл. № 26.
8. Согомонян К. Э. Воздействие ультракоротких импульсов электромагнитного излучения на беспилотные летательные аппараты // *Труды Международного симпозиума Надежность и качество*. 2019. Т. 2. С. 315–317.
9. Мельничук А. И., Горячев Н. В., Юрков Н. К. Способы и средства противодействия // *Надежность и качество сложных систем*. 2020. № 4. С. 131–138.
10. Гришко А. К. Оптимальное управление частотным ресурсом радиотехнических систем на основе вероятностного анализа динамики информационного конфликта // *Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета*. 2016. № 57. С. 21–28. doi: 10.21667/1995-4565-2016-57-3-21-28
11. Гришко А. К., Горячев Н. В., Юрков Н. К. Анализ математических моделей расчета электроакустических полей и дальности действия радиолокационных систем методом последовательного анализа // *Инженерный вестник Дона*. 2015. Т. 35, № 2–1. С. 16.
12. Andreev P. G., Yakimov A. N., Yurkov N. K. [et al.]. Methods of Calculating the Strength of Electric Component of Electromagnetic Field in Difficult Conditions // *12th International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE 2016)*. Saratov, Russia. 2016. Vol. 1. P. 1–7. doi: 10.1109/APEDE.2016.7878895
13. Гришко А. К. Оптимизация размещения элементов РЭС на основе многоуровневой геоинформационной модели // *Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки*. 2015. № 3. С. 85–90.
14. Гришко А. К., Жумабаева А. С., Юрков Н. К. Управление электромагнитной устойчивостью радиоэлектронных систем на основе вероятностного анализа динамики информационного конфликта // *Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль*. 2016. № 4. С. 49–58.
15. Grishko A. K. Parameter control of radio-electronic systems based of analysis of information conflict // *13th International Scientific Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE 2016)*. Novosibirsk, Russia. 2016. P. 107–111. doi: 10.1109/APEIE.2016.7806423
16. Grishko A., Goryachev N., Kochegarov I. [et al.]. Management of Structural Components Complex Electronic Systems on the Basis of Adaptive Model // *13th International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science (TCSET)*. Lviv–Slavsko, Ukraine, 2016. P. 214–218. doi: 10.1109/TCSET.2016.7452017
17. Grishko A., Goryachev N., Kochegarov I., Yurkov N. Dynamic Analysis and Optimization of Parameter Control in Radio Systems in Conditions of Interference // *International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*. Moscow, Russia, 2016. P. 1–4. doi: 10.1109/SIBCON.2016.7491674
18. Grigor'ev A., Grishko A., Goryachev N. [et al.]. Contactless Three-Component Measurement of Mirror Antenna Vibrations // *International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*. Moscow, Russia, 2016. P. 1–5. doi: 10.1109/SIBCON.2016.7491673
19. Grishko A., Goryachev N., Yurkov N. Adaptive Control of Functional Elements of Complex Radio Electronic Systems // *International Journal of Applied Engineering Research*. 2015. Vol. 10, № 23. P. 43842–43845.

Информация об авторах / Information about the authors

Антон Иванович Мельничук

инженер группы обслуживания и ремонта
бортовой контрольно-записывающей аппаратуры,
Учебная авиационная база
Краснодарского высшего военного
авиационного училища летчиков МО РФ
(Россия, Саратовская область,
г. Ртищево, ул. Котовского, 1/1)
E-mail: pelmenio@mail.ru

Anton I. Mel' nichuk

Engineer of the service and repair group
of on-board recording equipment training,
Aviation Base of the Krasnodar Higher Military
Aviation School of Pilots
of Russian Ministry of Defense
(1/1 Kotovsky street, Rtishchevo,
Saratov Region, Russia)

Николай Владимирович Горячев

кандидат технических наук,
доцент кафедры конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: ra4foc@yandex.ru

Николай Кондратьевич Юрков

доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ,
заведующий кафедрой конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: yurkov_NK@mail.ru

Nikolay V. Goryachev

Candidate of technical sciences,
associate professor of sub-department
of radio equipment design
and production,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Nikolay K. Yurkov

Doctor of technical sciences, professor,
the honoured worker of science
of the Russian Federation,
head of sub-department
of radio equipment design and production,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 15.04.2021

Поступила после рецензирования/Revised 30.04.2021

Принята к публикации/Accepted 15.05.2021

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПРОЦЕНТНОГО СОДЕРЖАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ УГЛЕРОДА К ПОЛИЭТИЛЕНУ В СОСТАВЕ ПОЛИМЕРНО-УГЛЕРОДНОГО КОМПОЗИТА

О. М. Денисова¹, К. М. Боронин², Т. В. Ларин³

^{1,3} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
^{1,2} Научно-исследовательский институт электронно-механических приборов, Пенза, Россия
¹ denisovaolga555@gmail.com, ^{2,3} timofeilarin@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Цель исследования заключается в обнаружении зависимости процентного соотношения полиэтилена к углероду, технического углерода двух марок друг к другу и влияние этого соотношения на результаты сопротивления и стабильность образцов. Тема является актуальной, так как в последнее время происходит быстрое развитие энергетики, микроэлектроники, науки, а разработка самовосстанавливающихся предохранителей возможна на основе систематических исследований электрофизических свойств композитных материалов. *Материалы и методы.* Резистивный элемент композиционных резисторов представляет собой гетерогенную систему, состоящую из нескольких фаз: технический углерод, полиэтилен и добавки. *Результаты.* Представлены результаты исследования полимерно-углеродных композитов на основе полиэтилена высокой плотности и технического углерода двух марок. Установлена зависимость процентного содержания полиэтилена к техническому углероду на изменения сопротивления композитного материала. Результаты исследований подтверждаются экспериментальными данными. *Выводы.* В результате исследования выявлено влияние увеличения концентрации полиэтилена на повышение сопротивления, а также влияние увеличения концентрации низкоомного технического углерода марки УТВО25 к высокоомному техническому углероду УТВО31 на стабильность показателей образцов без большого разброса сопротивлений.

Ключевые слова: полимерно-углеродный композит, полиэтилен, углерод технический, электропроводность, сопротивление

Для цитирования: Денисова О. М., Боронин К. М., Ларин Т. В. Исследование зависимости процентного содержания различных типов углерода к полиэтилену в составе полимерно-углеродного композита // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 2. С. 92–98. doi:10.21685/2307-4205-2021-2-9

STUDY OF THE DEPENDENCE OF THE PERCENTAGE OF DIFFERENT TYPES OF CARBON TO POLYETHYLENE IN THE COMPOSITION OF A POLYMER-CARBON COMPOSITE

O.M. Denisova¹, K.M. Boronin², T.V. Larin³

^{1,3} Penza State University, Penza, Russia
^{1,2} Scientific and Research Institute of Electronic Mechanic Instruments, Penza, Russia
¹ denisovaolga555@gmail.com, ^{2,3} timofeilarin@mail.ru

Abstract. *Background.* The aim of the study is to discover the dependence of the percentage ratio of polyethylene to carbon, carbon black of two grades to each other and the effect of this ratio on the results of resistance and stability of samples. The topic is relevant, since recently there has been a rapid development of power engineering, microelectronics, science, and the development of self-healing fuses is possible on the basis of systematic studies of the electrophysical properties of composite materials. *Materials and methods.* The resistor element of composite resistors is a heterogeneous system consisting of several phases: carbon black, polyethylene, and additives. *Results and conclusions.* The results of the study of polymer-carbon composites based on high density polyethylene and two grades of carbon black are presented. The dependence of the percentage of polyethylene to carbon black on changes in the resistance of the composite material has been established. The research results are confirmed by experimental data. *Conclusions.* As a result of the study, the influence of an increase in the concentration of polyethylene on an increase in resistance was revealed, as well as the effect of an increase in the concentration of low-resistance carbon black of the UTVO25 grade to high-resistance carbon black UTVO31 on the stability of the characteristics of samples without a large spread of resistances.

Keywords: polymer-carbon composite, polyethylene, technical carbon, electrical conductivity, resistance

For citation: Denisova O.M., Boronin K.M., Larin T.V. Study of the dependence of the percentage of different types of carbon to polyethylene in the composition of a polymer-carbon composite. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2021;2:92–98. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2021-2-9

Введение

В связи с быстрым развитием современной радиоэлектроники номенклатура резисторов непрерывно расширяется, и поэтому возникла потребность в разработке принципиально новых видов резисторов, в том числе предохранителей.

Резисторы – наиболее широко используемый в электронике пассивный элемент. Функция резистора – регулирование и распределение электрической энергии между элементами схем и электрическими цепями. В зависимости от материала, применяемого в резистивном элементе, резисторы разделяются на следующие группы (рис. 1):

- проволочные с резистивным элементом, выполненным из волоочной или литой проволоки с высоким удельным сопротивлением;
- непроволочные;
- металлофольговые с резистивным элементом, выполненным из фольги определенной конфигурации, нанесенной на изоляционное основание.



Рис. 1. Классификация резисторов по материалу резистивного элемента

Предохранитель – коммутационный электрический компонент, предназначенный для отключения защищаемой цепи размыканием или разрушением специально предусмотренных для этого токоведущих частей под действием тока, превышающего определенное значение. В предохранителях с плавким слоем при превышении тока свыше номинального происходит разрушение токопроводящего элемента предохранителя (расплавление, испарение), традиционно этот процесс называют «перегоранием» или «сгоранием» предохранителя. В слаботочных низковольтных цепях применяются самовосстанавливающиеся предохранители.

Самовосстанавливающиеся предохранители (СВП) относятся к композиционным резисторам. Композиционные резисторы представлены нескольких видов: пленочные и объемные. Их резистивный элемент представляет собой гетерогенную систему из нескольких фаз, получаемую путем механического смешивания проводящего компонента, например технического углерода, с органическими или неорганическими связующими (фенольными и эфирными смолами), наполнителя и добавками.

Полимерные СВП, на основе полимера с включенными углеродными наночастицами, являются резисторами из полимерно-углеродного композитного материала, обладающего гетероструктурой.

Проводимость композитных материалов определяется двумя механизмами: туннелированием между проводящими частицами в изолирующей фазе и протеканием (перколяцией) в непрерывной

сети проводящих частиц. При обычной температуре электрическая проводимость протекает через пористую структуру композита и зависит от свойств проводящего углеродного кластера и проводящих цепочек. При увеличении тока выше порогового в результате внутренней теплогенерации температура материала возрастает более 100 °С, что приводит к разрыву проводящих цепочек внутри полимерного композита. Перед разрушением композитов при высокой температуре энергетические барьеры между отдельными кристаллитами могут вносить заметные изменения в макроскопическую проводимость образца [1].

В результате плавления кристаллических частиц полимера для материалов с положительным температурным коэффициентом сопротивления (ТКС) объем частиц полимерного материала увеличивается, что приводит к разрушению перколяционного кластера и резкому увеличению сопротивления элемента (примерно на 5–6 порядков выше номинального сопротивления), что равносильно размыканию цепи. В момент снятия приложенного напряжения элемент автоматически переключается в исходное низкоомное состояние («самовосстанавливается»). Значение сопротивления предохранителя в проводящем состоянии составляет доли Ом, время срабатывания зависит от тока нагрузки и составляет 0,1–15 с, причем, чем больше ток, тем быстрее «срабатывает» предохранитель [2].

Одними из главных преимуществ полимерных СВП являются: малые массогабаритные размеры, устойчивость к механическим и ударным нагрузкам и вибрациям. Такие предохранители, имеющие положительный ТКС, могут выдерживать до 100 переключений без замены.

Разработка СВП может проводиться только при постоянных исследованиях и изучении электрофизических свойств композитных материалов, определении оптимальной структуры как полимерных цепей, так и углеродных частиц для обеспечения эффекта «переключения» материала при повышении температуры или значения тока выше порогового.

Важная характеристика СВП – величина позисторного эффекта, т.е. при превышении определенного порога воздействия происходит резкое возрастание электросопротивления.

Для формирования структуры (морфологии) полимер-углеродных материалов существует и применяется подход получения материалов на основе полимер-углеродов с требуемыми параметрами за счет подбора известных или получения новых типов исходных материалов, подбора комбинации их процентного соотношения [3, 4].

В работе исследуется зависимость сопротивления полимерно-углеродного композита (КПУ) от различного процентного соотношения технического углерода высокого сопротивления и низкого сопротивления к полиэтилену.

Такая задача является актуальной как для развития энергетики, микроэлектроники, науки, так и для улучшения технологий получения полимер-углеродных материалов для создания эффективных СВП, что в результате способствует повышению надежности изделий приборостроения.

Одним из важных элементов предохранителя является проводящий КПУ, который отформован в тонкий лист с нанесенными электродами на обеих плоскостях (рис. 2) [5].

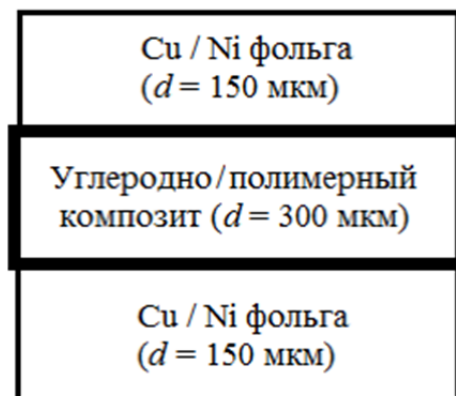


Рис. 2. Структура СВП в поперечном сечении

Полимерно-углеродный композит состоит из кристаллических гранул полимера, непроводящих электрический ток, и распределенных в нем наноразмерных частиц углерода, проводящих электрический ток, организующих кластер. Равномерное распределение потенциала по всей площади поверхности КПУ гарантируют электроды.

Одной из главных технологических проблем при создании СВП является процесс растворения и смешивания наночастиц углерода и полимера при создании КПУ в концентрации, необходимой для реализации перколяционной проводимости [6–8]. Для получения материала с высоким нелинейным ТКС находится оптимальное соотношение полимер/углерод, отталкиваясь от исходной марки полимера. Для электрофизических свойств СВП особенным свойством является наличие пороговой температуры, при достижении которой наблюдается логарифмический вид зависимости сопротивления от температуры и изменения сопротивления практически скачкообразного вида из проводящего в непроводящее состояние. Сопротивление СВП практически не изменяется при нагревании до пороговой температуры.

Существует три основных технологии изготовления полимеров:

- расплавная;
- порошковая;
- растворная.

Экспериментальная часть

В работе КПУ изготавливались по порошковой технологии. Такая технология обеспечивает дозирование углерода и перемешивание его с полимером до получения однородной смеси в сухом виде.

Основные стадии:

- измельчение кристаллического полимера до ультрадисперсного состояния;
- добавление ультрадисперсного углерода;
- перемешивание в сухом виде, гомогенизирование сухой смеси;
- добавление других полимеров и мономеров, антиоксидантов;
- горячее прессование при 160–180 °С (10–20 мин) в пластину 0,30 мм между контактов;
- сшивка, старение полимера, облучение пластины пучком электронов (энергия ~ 2–3 МэВ, при токе 180–250 мА) или рентгеновским излучением; возможна также химическая сшивка с использованием перексосульфата калия;
- электрические измерения необходимо отжигать 30–60 ч при температуре 40–70 °С и при напряжении 1–3 В.

Исходные материалы:

- полиэтилен низкого давления, высокой плотности 930–970 кг/м³; показатель текучести расплава при 190 °С и нагрузке 2,16 кг/10 мин; устойчив к термоокислительному разложению (деструкции) во время термической переработки; стойкость к растрескиванию – не менее 30 ч;
- углерод УТВО31 – полуактивный, получаемый при термоокислительном разложении природного газа в чистом виде или с добавками жидкого углеводородного сырья, с низким показателем дисперсности и низким показателем структурности;
- углерод УТНО25 – печной, полуактивный, получаемый при термоокислительном разложении жидкого углеводородного сырья, с низким показателем дисперсности и высоким показателем структурности;
- примеси: акриловая кислота, метил акрилат, этилен-бутил акрилат, фтор-этилен и др.; антиоксидант, чтобы предотвратить окисление в области контактов;
- материалы контактов: фольга медная, покрытая никелем и т.д.

Для исследования зависимости процентного содержания различных типов углерода к полиэтилену в составе полимерно-углеродного композита были взяты полимер марок (ПЭВП21 и ПЭНП704) и углерод марок УТВО31 (высокоомный) и УТНО25 (низкоомный) и изготовлены несколько партий КПУ в различном соотношении исходных компонентов.

Результаты и их обсуждение

Для исследования параметров сопротивления от процентного соотношения полиэтилена к техническому углероду были написаны разные составы. Для КПУ1 было взято 49 % полиэтилена к 51 % углерода, для следующих композитов соотношение менялось, становилось больше полиэтилена и меньше углерода, и уже в составе КПУ4 доля полиэтилена составила 54 % к 46 % углерода. Стоит отметить, что во всех четырех партиях было разное соотношение технического углерода двух

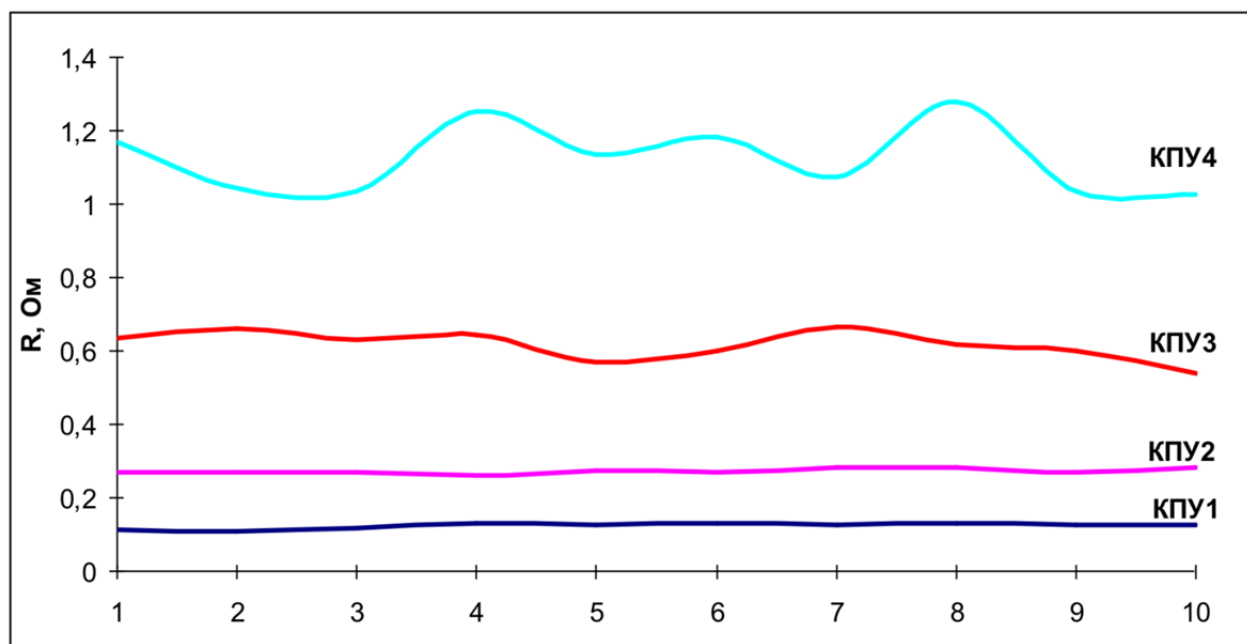
марок УТНО25 и УТВО31 друг к другу. В КПУ1 углерода марки УТНО25 приблизительно в два раза больше, чем марки УТВО31, а соотношение углеродов в КПУ4 обратное, углерода марки УТВО31 в два раза больше, чем УТНО25.

В результате написания составов с разным процентным соотношением углерода и полиэтилена и изготовления партий КПУ были получены результаты сопротивлений для каждой партии (табл. 1, рис. 3).

Таблица 1

Результаты сопротивлений для партий КПУ с разным процентным соотношением углерода и полиэтилена

Наименование	Сопротивление, Ом									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
КПУ1	0,112	0,109	0,116	0,130	0,125	0,130	0,127	0,129	0,125	0,124
КПУ2	0,268	0,268	0,271	0,263	0,272	0,269	0,283	0,284	0,270	0,284
КПУ3	0,633	0,662	0,630	0,642	0,568	0,600	0,665	0,617	0,602	0,539
КПУ4	1,169	1,044	1,035	1,253	1,135	1,182	1,074	1,277	1,035	1,028



Наименование	КПУ1, %	КПУ2, %	КПУ3, %	КПУ4, %
Углерод	51	48,5	47	46
Полиэтилен	49	51,5	53	54

Рис. 3. График зависимости сопротивления КПУ от процентного соотношения углерода и полиэтилена

Из представленных результатов в табл. 1 видно, что сопротивление КПУ1 значительно ниже сопротивлений КПУ4. Такое различие сопротивлений обусловлено тем, что в составе КПУ1 содержится меньше полиэтилена, чем в КПУ4, соответственно, больше технического углерода. Соотношение двух марок технического углерода также может варьироваться для изменения сопротивления в большую или меньшую сторону. Так, в КПУ1 содержится больше низкоомного углерода (УТНО25) и меньше высокоомного (УТВО31), в КПУ4 процентное содержание технического углерода рассчитано так, что берется больше высокоомного и меньше низкоомного углерода практически в таких же пропорциях.

Из рис. 1 видно, что при большем добавлении технического углерода марки УТВО31 значения сопротивления полимерно-углеродного композита становятся более стабильными, наблюдается меньший разброс (нет скачков) между образцами.

Заключение

В работе были изготовлены КПУ разные по составу и получены значения сопротивлений электропроводности. Установлено, что изменение процентного соотношения полиэтилена к техническому углероду в составе КПУ приводит к изменению его номинального сопротивления, а изменение соотношения низкоомного и высокоомного технического углерода друг к другу к стабильности значений сопротивления.

Рассмотрение полученных результатов позволило сделать вывод, что для изготовления (производства) высокоточных прецизионных резисторов необходимо контролировать процентное содержание технического углерода низкого сопротивления марки УТНО25 к техническому углероду высокого сопротивления марки УТВО31, а также содержание полиэтилена к углероду в пропорциональном соотношении друг к другу.

Список литературы

1. Каминская Т. П., Подшибякин С. В. Сшивка полимерно-углеродных композитов для самовосстанавливающихся предохранителей // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2008. Т. 2. С. 143–144.
2. Недорезов В. Г., Подшибякин С. В., Каминская Т. П. [и др.]. Исследование и разработка самовосстанавливающихся предохранителей на фазовом переходе // Материалы, изделия и технологии пассивной электроники : труды Междунар. конф. Пенза, 2007. С. 83–90.
3. Баженов С. Л., Берлин А. А., Кульков А. А., Ошмян В. Г. Полимерные композиционные материалы. Долгопрудный : Интеллект, 2010. С. 352.
4. Шевченко В. Г. Основы физики полимерных композиционных материалов. М. : Изд-во МГУ им. М. В. Ломоносова, 2010. С. 99.
5. Домкин К. И. Технология производства самовосстанавливающихся предохранителей с высоким позисторным эффектом на основе полимерных материалов : дис. ... канд. техн. наук. Пенза, 2016. С. 119.
6. Патент 2127742 Российская Федерация. Способ обработки полиэтилена / Коршунов А. Б., Зезин Ю. П., Кустиков О. Т., Гаськов А. М., Голубцов И. В., Шестериков С. А. № 96106966/04 ; заявл. 08.04.1996 ; опубл. 20.03.1999.
7. Патент 2128194 Российская Федерация. Способ обработки полимерных материалов / Коршунов А. Б., Зезин Ю. П., Кустиков О. Т., Гаськов А. М., Голубцов И. В., Шестериков С. А. № 96106965/04; заявл. 08.04.1996 ; опубл. 27.03.1999.
8. US Patent Application 20120038079. Method for preparing an electrically conducting article / Perrier O., Rocle D., Delacourt G., Galiano H., Mazabraud P., Descarsin D. Declared 29.01.2010 ; Published 16.02.2012.

References

1. Kaminskaya T.P., Podshibyakin S.V. Crosslinking of polymer-carbon composites for self-healing fuses. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2008;2:143–144. (In Russ.)
2. Nedorezov V.G., Podshibyakin S.V., Kaminskaya T.P. [et al.]. Research and development of self-repairing fuses at the phase transition. *Materialy, izdeliya i tekhnologii passivnoy elektroniki: trudy Mezhdunar. konf. = Materials, products and technologies of passive electronics : proceedings of the International conf.* Penza, 2007:83–90. (In Russ.)
3. Bazhenov S.L., Berlin A.A., Kul'kov A.A., Oshmyan V.G. *Polimernye kompozitsionnye materialy = Polymer composite materials*. Dolgoprudnyy: Intellekt, 2010:352. (In Russ.)
4. Shevchenko V.G. *Osnovy fiziki polimernykh kompozitsionnykh materialov = Fundamentals of physics of polymer composite materials*. Moscow: Izd-vo MGU im. M.V. Lomonosova, 2010 99. (In Russ.)
5. Domkin K.I. Technology of production of self-healing fuses with a high posistor effect based on polymer materials. PhD dissertation. Penza, 2016:119. (In Russ.)
6. Patent 2127742 Russian Federation. *Sposob obrabotki polietilena = Patent 2127742. russian federation. Method of processing polyethylene*. Korshunov A.B., Zezin Yu.P., Kustikov O.T., Gas'kov A.M., Golubtsov I.V., Shesterikov S.A. No. 96106966/04; appl. 08.04.1996; publ. 20.03.1999. (In Russ.)
7. Patent 2128194 Russian Federation. *Sposob obrabotki polimernykh materialov = Patent 2128194. russian federation. Method of processing polymer materials*. Korshunov A.B., Zezin Yu.P., Kustikov O.T., Gas'kov A.M., Golubtsov I.V., Shesterikov S.A. No. 96106965/04; appl. 08.04.1996; publ. 27.03.1999. (In Russ.)
8. US Patent Application 20120038079. *Method for preparing an electrically conducting article*. Perrier O., Rocle D., Delacourt G., Galiano H., Mazabraud P., Descarsin D. Declared 29.01.2010; Published 16.02.2012.

Информация об авторах / Information about the authors

Ольга Михайловна Денисова

магистрант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40);
инженер-технолог,
Научно-исследовательский институт
электронно-механических приборов
(Россия, г. Пенза, ул. Каракозова, 44)
E-mail: denisovaolga555@gmail.com

Olga M. Denisova

Master degree student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia);
Process engineer,
Scientific and Research Institute
of Electronic Mechanic Instruments
(44 Karakozova street, Penza, Russia)

Кирилл Михайлович Боронин

начальник экспериментально-производственного
отдела,
Научно-исследовательский институт
электронно-механических приборов
(Россия, г. Пенза, ул. Каракозова, 44)
E-mail: timofeilarin@mail.ru

Kirill M. Boronin

Head of Experimental Production Department,
Scientific and Research Institute
of Electronic Mechanic Instruments
(44 Karakozova street, Penza, Russia)

Тимофей Владимирович Ларин

магистрант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: timofeilarin@mail.ru

Timofey V. Larin

Master degree student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 17.05.2021

Поступила после рецензирования/Revised 28.05.2021

Принята к публикации/Accepted 01.06.2021

БЕЗОПАСНОСТЬ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

SAFETY IN EMERGENCY SITUATIONS

УДК 004.05

doi:10.21685/2307-4205-2021-2-10

ПРАКТИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ ПРОВЕДЕНИЯ СЕРТИФИКАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ ПРОГРАММНЫХ ИЗДЕЛИЙ

В. В. Самаров

ООО «16 НИИЦ», Мытищи, Россия
samarov_vladimir@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рассматриваются проблемные вопросы, возникающие при проведении сертификационных испытаний программных изделий, предназначенных для обработки конфиденциальной информации, не содержащей сведения, составляющие государственную тайну, в системе сертификации Минобороны России. *Материалы и методы.* При рассмотрении решаемых при проведении сертификационных испытаний задач был сделан акцент на возможность и важность практической реализации связанных с этими задачами операций, успешное выполнение которых в свою очередь представляется необходимым для контроля отсутствия недеklarированных возможностей в исследуемом программном изделии. *Результаты и выводы.* По результатам рассмотрения обозначенных проблемных вопросов дано обоснование целесообразности решения рассмотренных задач и актуальности разработки методики проведения соответствующих этапов сертификационных испытаний.

Ключевые слова: сертификационные испытания программных изделий, проблемные вопросы сертификационных испытаний, автоматизация сертификационных испытаний

Для цитирования: Самаров В. В. Практические вопросы проведения сертификационных испытаний программных изделий // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 2. С. 99–103. doi:10.21685/2307-4205-2021-2-10

PRACTICAL ISSUES OF CONDUCTING CERTIFICATION TESTS OF SOFTWARE PRODUCTS

V.V. Samarov

LLC "16 NIITS", Mytishchi, Russia
samarov_vladimir@mail.ru

Abstract. *Background.* The article deals with the problematic issues that arise during certification tests of software products intended for processing confidential information that does not contain information constituting a state secret in the certification system of the Ministry of Defense of Russia. *Materials and methods.* When considering the tasks solved during certification tests, an emphasis was made on the possibility and importance of the practical implementation of operations related to these tasks, the successful implementation of which, in turn, seems to be necessary to control the absence of undeclared capabilities in the software product under study. *Results and conclusions.* Based on the results of considering the identified problematic issues, a justification was given for the expediency of solving the considered problems and the relevance of developing a methodology for conducting the corresponding stages of certification tests.

Keywords: certification tests of software products, problematic issues of certification tests, automation of certification tests

For citation: Samarov V.V. Practical issues of conducting certification tests of software products. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2021;2:99–103. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2021-2-10

При проведении сертификационных испытаний программных изделий в системе сертификации Минобороны России, по 4-му уровню контроля отсутствия недеklarированных возможностей, в соответствии с руководящим документом «Защита от несанкционированного доступа к информации. Часть 1. Программное обеспечение средств защиты информации. Классификация по уровню контроля отсутствия недеklarированных возможностей» (Гостехкомиссия России, Москва, 1999) (далее – РД НДВ) перед специалистами испытательных лабораторий ставятся следующие задачи:

1) контроль требований по составу и содержанию программной (в т.ч. эксплуатационной) документации;

2) контроль исходного состояния программного обеспечения (ПО);

3) проведение статического анализа исходных текстов ПО, в том числе:

– контроль полноты и отсутствия избыточности исходных текстов на уровне файлов;

– контроль соответствия исходных текстов ПО его объектному (загрузочному) коду.

Практика проведенных работ по сертификационным испытаниям программных изделий в испытательной лаборатории ООО «16 НИИЦ» показала, что при проведении проверок 2–3 зачастую возникают проблемные вопросы, требующие решения. Ниже рассматриваются решаемые при проведении сертификационных испытаний программных изделий задачи и проблемные вопросы, возникающие в контексте выполнения этих задач.

1. Задача по контролю исходного состояния программного изделия.

При решении этой задачи на практике зачастую возникают следующие проблемы:

А. «Потеря» файлов при разархивировании пакетов с исходными текстами¹ и дистрибутивами. Данная ситуация встречается достаточно часто, при осуществлении соответствующих работ в операционных системах семейства Windows (далее – ОС Windows). Это обусловлено тем, что большинство приложений ОС Windows (включая архиваторы и рекомендованные регулятором программы по контролю исходного состояния программных изделий) не умеют работать с длинными путями (рубрика старых версий ОС Windows, где значение параметра² Win32 API MAX_PATH = 260).

Решить данную проблему можно, проводя соответствующий этап работ в ОС семейства Linux³ (где данная проблема как таковая отсутствует), однако здесь зачастую возникает другая проблема, связанная со сложившейся ситуацией, описанной в п. Б).

Б. Отсутствие рекомендованных регулятором⁴ средств контроля исходного состояния сертифицируемых программных изделий, функционирующих во всех ОС семейства Linux и имеющих возможность автоматизированного контроля файлов по всем (большинству) используемым алгоритмам контрольного суммирования⁵. Таким образом, в случае, если заявитель сертификационных

¹ Задача корректного разархивирования пакетов с исходными текстами также может быть актуальной при осуществлении работ в рамках статического анализа кода (при выполнении проверок в соответствии с требованиями 1–3 уровней контроля НДВ). Связано это с тем, что большая часть статических анализаторов исходных кодов предназначена для функционирования в ОС Windows. Следует отметить, что в рассмотренном случае (после выполнения статического анализа) дополнительно возникает обратная задача по приведению обработанного пакета с файлами исходных текстов к исходному виду и структуре.

² Стоит отметить, что в ОС Windows 10 (начиная с версии 1607) появилась возможность отключить проверку MAX_PATH с помощью групповых политик (**gpedit.msc**) или путем редактирования реестра [1] (команда в PowerShell : `Set-ItemProperty -Path HKLM:\SYSTEM\CurrentControlSet\Control\FileSystem -Name LongPathsEnabled -Value 1`). Вместе с тем выполнение данных действий полностью не решает проблему ввиду того, что проверка длины пути интегрирована в код соответствующих прикладных приложений.

³ Здесь и далее под ОС семейства Linux будем понимать операционные системы, построенные на базе ОС Linux и имеющие сертификаты соответствия (заключения по безопасности), выданные органом по сертификации Минобороны России.

⁴ Стоит отметить, что рекомендованные средства контроля имеются, однако поддержка ими устаревших, а также современных алгоритмов хеширования ограничена (неполная).

⁵ На практике разработчики заявляемых на сертификационные испытания программных изделий при проведении соответствующих работ, проведение которых предполагает использование хэш-функций, используют множество алгоритмов контрольного суммирования (от старых, например: CRC8/16/32, ГОСТ 34.11-94, MD-4 и др.; до современных, например: SHA-3, ГОСТ Р 34.11-2012 «Стрибог» (Хэш 256 и 512 бит) и др.).

испытаний использует алгоритм, поддержка которого отсутствует в рекомендованных регулятором средствах анализа, испытательная лаборатория вынуждена решать данную проблему самостоятельно, в том числе путем экспертной верификации алгоритма, используемого заявителем при контрольном суммировании файлов.

2. Задача по идентификации в пакете с исходными текстами бинарных файлов, не имеющих соответствующих им исходных текстов, а также полного (фактического) перечня файлов исходных текстов.

Важность данной задачи обусловлена тем, что:

- в пакетах с исходными текстами, представляемых на сертификационные испытания, недопустимо наличие бинарных файлов различного назначения (библиотеки, драйвера, исполняемые файлы, объектные файлы компилятора и иные бинарные файловые объекты) без присутствия соответствующих им исходных кодов, а также декларирования такого соответствия в программной документации (формально, данное требование можно отнести к требованию, как по контролю полноты, так и по отсутствию избыточности исходных текстов);

- при проведении сертификационных испытаний должны быть проверены все наличествующие в пакете с исходными текстами файлы исходных текстов, а не только те, которые декларированы разработчиком.

Сложность решения данной задачи заключается в том, что встречаются ситуации, когда в пакете с исходными текстами присутствуют файлы без расширений или с расширениями, не соответствующими их действительному типу. Таким образом, формирование (поиск) перечней как бинарных файлов, так и файлов исходных текстов по расширению может не достичь поставленных целей.

Вместе с тем следует отметить, что ввиду того, что данная задача никак не выделена на уровне РД НДВ, то ее решение в принципе не проработано, а методы контроля, носящие рекомендательный характер, отсутствуют.

3. Задача по контролю полноты и отсутствию избыточности исходных текстов на уровне файлов¹ [2].

Данная задача представляет практический интерес при выполнении соответствующего этапа сертификационных испытаний для программных изделий, разработанных на компилируемых языках программирования (в том числе для наиболее широко используемых при разработке программных изделий языках C/C++/C# и их диалектов, а также на языке Java).

При этом разработчиками используется все многообразие существующих средств разработки (в том числе средств компиляции и сборки пакетов с исходными текстами в дистрибутивные пакеты), а унификация этих средств отсутствует.

В результате на практике при использовании распространенной схемы проведения данного этапа испытаний, при которой необходимо получить информативный протокол сборки² соответствующих дистрибутивных пакетов из исходных текстов, зачастую возникают проблемы, требующие для их решения значительных трудозатрат специалистов испытательных лабораторий.

4. Задача по идентификации среды разработки и сборки.

Идентификация среды разработки важна в контексте определения перечня использованных в исследуемом проекте библиотек (как статических, так и динамических). Если по результатам идентификации окажется, что используемая среда разработки не доверенная, т.е. не имеет подтверждения о соответствии требованиям безопасности информации (в том числе и в составе других программных изделий (средств)), то при проведении сертификационных испытаний программного изделия необходимо будет к файлам исходных текстов проверяемого изделия добавить файлы исходных текстов соответствующих библиотек³ (как статических, так и разделяемых (динамических)).

¹ Как было отмечено выше, этапом, предшествующим выполнению рассматриваемой задачи, можно считать действия, описанные в п. 2 рассматриваемых задач.

² Данная задача была решена с использованием системы аудита ОС Linux [3]. По результатам решения данной задачи был разработан кросс-платформенный программный модуль на языке Питон, который успешно используется специалистами ООО «16 НИИЦ» в повседневной деятельности.

³ В перечень дополнительно проверяемых файлов должны быть включены файлы исходных текстов библиотек, непосредственно задействованных в исследуемом проекте (подключаемых к создаваемым объектным файлам на этапе линковки (в случае со статическими библиотеками) или необходимыми для функционирования скомпилированных объектных файлов (в части разделяемых библиотек)).

Идентификация среды сборки важна из-за того, что средства компиляции и сборки разных версий не могут обеспечить получение одинаковых бинарных целевых файлов, что необходимо при проведении соответствующего этапа сертификации (контроля соответствия исходных текстов их объектному (загрузочному) коду)¹. Кроме того, при выполнении данного этапа проверок также проверяется происхождение соответствующих утилит, осуществляющих компиляцию и сборку контролируемого программного изделия².

На практике основная сложность решения рассматриваемой задачи заключается в определении фактически используемых (задействованных) для исследуемого проекта библиотек и последующая верификация данных библиотек на предмет их происхождения. В дополнение к этому необходимо произвести идентификацию среды компиляции и сборки.

Решение данной задачи из-за отсутствия в ее части строгих требований в РД НДВ в целом не проработано. Вместе с тем, по мнению автора, имеется необходимость в анализе возможных источников получения соответствующих релевантных данных и используемых для этого методов с целью выработки комплексного алгоритма по решению рассматриваемой задачи.

В статье рассмотрены актуальные задачи, решаемые при проведении сертификационных испытаний программных изделий по требованиям РД НДВ по четвертому уровню контроля, и практические проблемы, возникающие при их решении.

Выполнение рассмотренных задач в части деятельности испытательных лабораторий имеет значительный практический интерес и позволяет в случае их успешного решения более эффективно проводить сертификационные испытания³.

На основании изложенного материала представляется целесообразным:

- проработать варианты решения рассмотренных выше задач и с учетом обозначенных проблемных вопросов разработать методику проведения соответствующих этапов сертификационных испытаний по четвертому уровню;
- рассмотреть возможность автоматизации выполнения соответствующих задач, решаемых на этапах проведения сертификационных испытаний.

Список литературы

1. Ошибка «слишком длинный путь» (path too long) в Windows 10. URL: <https://www.geeklib.ru/users/windows10/2018/04/oshibka-slishkom-dlinnyj-put-path-too-long-v-windows-10> (дата обращения: 24.03.2021).
2. Самаров В. В. Использование системы аудита операционных систем семейства Linux при проведении сертификационных испытаний программных изделий // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 1. С. 144–150. doi:10.21685/2307-4205-2021-1-14

References

1. *Oshibka «slishkom dlinny put'» (path too long) v Windows 10 = Ошибка "слишком длинный путь" (слишком длинный путь) в Windows 10.* (In Russ.). Available at: <https://www.geeklib.ru/users/windows10/2018/04/oshibka-slishkom-dlinnyj-put-path-too-long-v-windows-10> (accessed 24.03.2021).
2. Samarov V.V. Use of the Linux operating system audit system when conducting certification tests of software products. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2021;(1): 144–150. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2021-1-14

¹ К среде компиляции и сборки относятся как непосредственно сам компилятор, так и программные средства, управляющие сборкой (например: make, cmake, maven, ant и др.), а также утилиты, осуществляющие упаковку/архивирование скомпилированных бинарных файлов проекта в соответствующие пакеты (например: deb, rpm, spio, tar и др.).

² В идеале используемые средства компиляции и сборки должны быть сертифицированы по требованиям безопасности информации. Минимальное требование к таким средствам – фиксация в архиве предприятия разработчика как непосредственно исполняемых файлов этих средств, так и всех соответствующих им файлов исходных текстов (на этапе проведения сертификационных испытаний для этих средств проводится контрольная сборка с целью установления соответствия заложенных в архив исходных текстов, соответствующим им загрузочным модулям).

³ Под эффективностью в данном контексте понимается возможность формирования обоснованного заключения по результатам контроля требований РД НДВ, с учетом рассмотренных задач (в том числе и задач, отсутствующих в явном виде в РД НДВ).

Информация об авторах / Information about the authors

Владимир Владимирович Самаров

заместитель начальника испытательной лаборатории,

ООО «16 НИИЦ»

(Россия, Московская обл., г. Мытищи,

Олимпийский просп., 29, вл. 2, 7А-4)

E-mail: samarov_vladimir@mail.ru

Vladimir V. Samarov

Deputy head of test laboratory,

LLC "16 NIITS "

(7А-4, 2, 29 Olimpiyskiy avenue, Mytisch,

Moscow region, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 17.04.2021

Поступила после рецензирования/Revised 27.04.2021

Принята к публикации/Accepted 01.05.2021

ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ КОНТРОЛЯ ФАЙЛОВОЙ ИЗБЫТОЧНОСТИ И ПОДТВЕРЖДЕНИЯ ПОЛНОТЫ ИСХОДНЫХ ТЕКСТОВ НА УРОВНЕ ФАЙЛОВ

В. В. Самаров¹, Н. К. Юрков²

¹ ООО «16 НИИЦ», Мытищи, Россия

² Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹ samarov_vladimir@mail.ru, ² yurkov_NK@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Описаны пользовательский интерфейс и порядок работы с разработанным программным модулем, осуществляющим контроль полноты и отсутствия файловой избыточности в исследуемом в рамках сертификационных испытаний программном изделии. *Материалы и методы.* При проведении анализа сравниваются два множества: перечень файлов с исходными текстами; протокол сборки (компиляции) исследуемых исходных текстов в соответствующий дистрибутивный пакет (загрузочные модули), полученный при использовании системы аудита операционных систем семейства Linux. *Результаты и выводы.* Использование унифицированных протоколов аудита позволило реализовать программный алгоритм, при котором имеется возможность контроля файловой избыточности и установления полноты на уровне файлов для исследуемых проектов любых объемов и структуры, а также вне зависимости от используемых для их сборки (компиляции) схем.

Ключевые слова: сертификационные испытания программных изделий, контроль полноты и отсутствия избыточности на уровне файлов, система аудита ОС Linux, автоматизация сертификационных испытаний

Для цитирования: Самаров В. В., Юрков Н. К. Программная реализация контроля файловой избыточности и подтверждения полноты исходных текстов на уровне файлов // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 2. С. 104–108. doi:10.21685/2307-4205-2021-2-11

SOFTWARE IMPLEMENTATION OF FILE REDUNDANCY CONTROL AND CONFIRMATION OF THE COMPLETENESS OF THE SOURCE TEXTS AT THE FILE LEVEL

V.V. Samarov¹, N.K. Yurkov²

¹ LLC "16 NIITS", Mytishchi, Russia

² Penza State University, Penza, Russia

¹ samarov_vladimir@mail.ru, ² yurkov_NK@mail.ru

Abstract. *Background.* The article describes the user interface and the procedure for working with the developed software module that monitors the completeness and absence of file redundancy in the software product under study, as part of certification tests. *Materials and methods.* During the analysis, two sets are compared: a list of files with source texts; the protocol of assembly (compilation) of the source texts under investigation into the corresponding distribution package (load modules) obtained using the audit system of operating systems of the Linux family. *Results and conclusions.* The use of unified audit protocols made it possible to implement a software algorithm in which it is possible to control file redundancy and establish completeness at the file level for the projects under study of any size and structure, as well as regardless of the schemes used for their assembly (compilation).

Keywords: certification testing of software products, control of completeness and lack of redundancy at the file level, audit system of Linux OS, automation of certification tests

For citation: Samarov V.V., Yurkov N.K. Software implementation of file redundancy control and confirmation of the completeness of the source texts at the file level. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2021;2:104–108. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2021-2-11

Использование механизмов, предоставляемых системой аудита ОС Linux, начиная с версии 2.6 [1], позволило разработать алгоритм [2] по формированию унифицированного протокола (рис. 1) компиляции (сборки), исследуемого в рамках сертификационных испытаний, проводимых в системе сертификации Минобороны России, программного изделия.

```
File Report
=====
# date time file syscall success exe auid event
=====
1. 22.03.2021 18:38:38 /home/sam/test/ open yes /bin/bash sam 218
2. 22.03.2021 18:38:39 /home/sam/test/ open yes /bin/bash sam 219
3. 22.03.2021 18:38:39 /home/sam/test/ open yes /bin/bash sam 220
4. 22.03.2021 18:38:38 /home/sam/test/ open yes /bin/bash sam 217
5. 22.03.2021 18:38:42 /home/sam/test/ open yes /bin/bash sam 222
6. 22.03.2021 18:38:42 /home/sam/test/ open yes /bin/bash sam 221
7. 22.03.2021 18:38:54 makefile open yes /usr/bin/make sam 224
8. 22.03.2021 18:38:54 . open yes /usr/bin/make sam 223
9. 22.03.2021 18:38:54 hello.c open yes /usr/lib/gcc/x86_64-linux-gnu/6/cc1 sam 225
10. 22.03.2021 18:38:55 main.c open yes /usr/lib/gcc/x86_64-linux-gnu/6/cc1 sam 226
```

Рис. 1. Формат унифицированного протокола компиляции (сборки)
на примере фрагмента соответствующего протокола для тестового проекта

В свою очередь, возможность получения протокола компиляции (сборки), имеющего унифицированную форму для любых (не зависящих от используемых схем и средств сборки) компилируемых (собираемых) из исходных текстов программных изделий, позволила коллективу испытательной лаборатории ООО «16 НИИЦ», под руководством и при непосредственном участии автора статьи, разработать программу, осуществляющую контроль файловой избыточности и устанавливающую факт полноты анализируемого пакета с исходными текстами.

Действительно, имея унифицированный формат протокола сборки (рис. 1), имеется возможность выполнять данный этап проверок с учетом следующих условий:

- наличия в анализируемом проекте файлов исходных текстов с одинаковыми именами, но находящихся в разных каталогах (актуально для больших проектов);
- исключения из анализа «ложных» срабатываний (событий, непосредственно не связанных со сборкой проекта, но формирующих в протоколе сборки семантический «след» того или иного файла с исходными текстами), т.е. анализ только успешных событий по сборке;
- учет регистра имен файлов и соответствующих к ним путей в соответствии с особенностью файловых систем семейства типа extfs¹ (ext2-ext4) [2, 3].

В целях осуществления платформенной совместимости программа была разработана на языке Python, версии 3.4.3 [5], что позволяет без модификации использовать ее в ОС Windows (версий XP и выше), а также на большинстве операционных систем семейства Linux, имеющих соответствующие сертификаты (заключения) о соответствии безопасности информации, выданные Минобороны России.

Программа позволяет:

- успешно обрабатывать «смешанные» входные данные, т.е. на вход программы может быть подан файл, представляющий собой перечень файлов проекта (исходных текстов), сформированный любым удобным способом как в ОС семейства Windows, так в Linux системах;
- формировать информативные и удобочитаемые отчеты в текстовом формате, а также в формате html;
- успешно и быстро обрабатывать входные данные значительных объемов.

Алгоритм работы с программой:

1. Подготовить исходные данные, в том числе:

- произвести построение списков с файлами исходных текстов (для чего воспользоваться любым удобным средством, например ПС «Total Commander» или любым другим). Файл с перечнем исходных текстов может быть в любой стандартной кодировке и должен представлять собой тексто-

¹ Ввиду того, что в ядро ОС Linux для файловой системы ext4 была включена поддержка работы без учета регистра символов [4], то для корректной работы программного модуля, была предусмотрена возможность такого анализа.

вый файл. Формат входного файла с перечнем исходных текстов представляет собой массив со строками¹ (рис. 2);

```
J:\exmp\TEST\assembly_TEST\data\app\data\Application.cpp
J:\exmp\TEST\assembly_TEST\data\app\data\application.h
.....
J:\exmp\TEST\assembly_TEST\data\app\data\main.cpp
```

Рис. 2. Пример представления перечня анализируемых файлов исходных текстов

– сформировать протокол компиляции анализируемого проекта, для чего воспользоваться алгоритмом [1] по его (протокола) созданию с помощью системы аудита ОС семейства Linux:

– при необходимости установить на сборочную систему соответствующую службу (auditd);

– осуществить постановку на контроль (аудит) всех обращений к объектам (файлам с анализируемыми исходными текстами), находящимся в соответствующем каталоге (команда: `$ sudo auditctl -w /Dest/for/src -p rwx`, где `/Dest/for/src` – абсолютный путь к каталогу с анализируемыми исходными текстами);

– произвести штатную сборку (в соответствии с действиями, описанными в соответствующей программной документации программного изделия) исследуемого проекта;

– с помощью утилиты `aureport` сформировать соответствующий (см. рис.1) протокол сборки (команда: `$ sudo aureport -f -i - success > log_file`, где `log_file` – имя файла содержащего записи протоколирующие процесс компиляции (сборки) тестового проекта).

2. В зависимости от используемой ОС запустить соответствующий интерпретатор командной строки (например, `cmd` – для ОС Windows или `bash` терминал – для ОС Linux).

3. Перейти в каталог с файлами программы, после чего выполнить команду вида

```
C:\Test\files_cmpr\>python app.py --first = data/SRC_test.txt --second =
data/log_file --dest_path = assembly_TEST --reg = 1 --exts = "cpp|h" // -
для ОС семейства Windows
```

```
user@deb:~$ python3 app.py --first = data/ SRC_test.txt --second = da-
ta/log_file --dest_path = assembly_TEST --reg = 1 --exts = "cpp|h" // -
для ОС семейства Linux
```

где *first* – путь к файлу с перечнем файлов исходных текстов; *second* – путь к файлу с протоколом компиляции проекта²; *dest_path* – имя каталога (верхнего каталога, включая подкаталоги) с анализируемыми исходными текстами³; *reg* – параметр, отвечающий за правило сравнения (1 – учитывать регистр символов в названии файлов; 0 – не учитывать регистр символов в названии файлов); *exts* – маска поиска (через символ «|» перечисляются расширения файлов, по которым осуществляется анализ).

4. Перейти в каталог «results» программы и ознакомиться со сформированными отчетными материалами, в том числе:

– с файлами `Rep_equals.txt` (отчет по одинаковым файлам), `Rep_file1_only.txt` (отчет по избыточным файлам), `Rep_file2_only.txt` (отчет по файлам, не отвечающим требованиям по полноте исходных текстов) (рис. 3);

– со сводным html отчетом (рис. 4).

В заключение хотелось бы отметить, что описанный в настоящей статье программный модуль по контролю полноты и отсутствия избыточности на уровне файлов успешно апробирован специалистами испытательной лаборатории ООО «16 НИИЦ» при проведении ими сертификационных испытаний программных изделий.

¹ Для корректной работы программы требуется указание абсолютных путей к соответствующим файлам исходных текстов.

² В приведенном примере указан относительный путь к сравниваемым файлам, находящимся в каталоге «data/» программы.

³ Для получения релевантных результатов анализа необходимо, чтобы имя каталога с анализируемыми исходными текстами из файла с исходными текстами коррелировало с именем каталога с исходными текстами участвовавшего в сборке проекта.

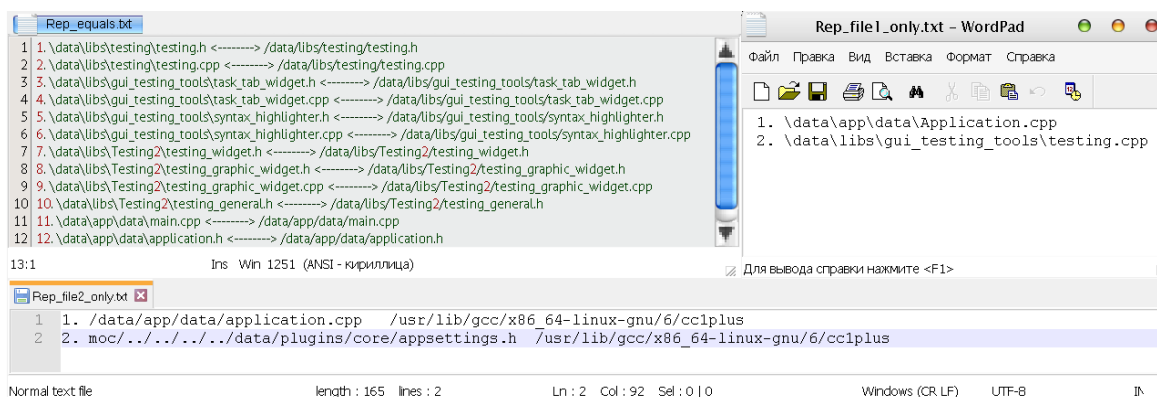


Рис. 3. Видеокадр сформированных по результатам анализа тестового примера файлов

Отчёт сравнения файлов

Сравниваются файлы:

- data/SRC_test.txt
- data/log_file

Алгоритм по контролю: assembly_TEST

Одинаковые файлы

ID	data/SRC_test.txt	data/log_file
1	/data/libs/testing/testing.h	/data/libs/testing/testing.h
2	/data/libs/testing/testing.cpp	/data/libs/testing/testing.cpp
3	/data/libs/gui_testing_tools/task_tab_widget.h	/data/libs/gui_testing_tools/task_tab_widget.h
4	/data/libs/gui_testing_tools/task_tab_widget.cpp	/data/libs/gui_testing_tools/task_tab_widget.cpp
5	/data/libs/gui_testing_tools/syntax_highlighter.h	/data/libs/gui_testing_tools/syntax_highlighter.h
6	/data/libs/gui_testing_tools/syntax_highlighter.cpp	/data/libs/gui_testing_tools/syntax_highlighter.cpp
7	/data/libs/Testing2/testing_widget.h	/data/libs/Testing2/testing_widget.h
8	/data/libs/Testing2/testing_graphic_widget.h	/data/libs/Testing2/testing_graphic_widget.h
9	/data/libs/Testing2/testing_graphic_widget.cpp	/data/libs/Testing2/testing_graphic_widget.cpp
10	/data/libs/Testing2/testing_general.h	/data/libs/Testing2/testing_general.h
11	/data/app/data/main.cpp	/data/app/data/main.cpp
12	/data/app/data/application.h	/data/app/data/application.h
13	/data/app/data/application.cpp	-----
14	/data/libs/gui_testing_tools/testing.cpp	-----
15	-----	/data/app/data/application.cpp
16	-----	mod. /usr/lib/gcc/x86_64-linux-gnu/6/cc1plus

Файлы имеющиеся только в файле: data/SRC_test.txt

ID	data/SRC_test.txt
1	/data/libs/gui_testing_tools/testing.cpp
2	/data/app/data/application.cpp

Файлы имеющиеся только в файле: data/log_file

ID	data/log_file
1	mod. /usr/lib/gcc/x86_64-linux-gnu/6/cc1plus
2	/data/app/data/application.cpp

Рис. 4. Видеокадр сводного html отчета по файловой избыточности и полноте тестового примера

Вместе с тем интерпретация выходных данных программного модуля в части файлов, которые по результатам анализа помечены как не соответствующие требованиям по полноте исходных текстов (отчет – Rep_file2_only.txt (см. рис. 3), и третья таблица в сводном html отчете (рис. 4) требует от специалистов проводящих испытания достаточно серьезных знаний в современных методах и способах компиляции исходных текстов (например, принципов работы метаобъектного компилятора на основе библиотеки qt [6] или метаобъектных протоколов (например, Google Protobuff [7]), а также зачастую значительных временных затрат. Таким образом, по мнению автора, целесообразно проработать вопрос о расширении функционала программного модуля в части добавления в него механизмов по предоставлению дополнительной информации, использование которой позволит упростить принятие решения по таким (генерируемым в процессе компиляции) файлам.

Список литературы

1. Пингвин под колпаком: Аудит системных событий в линукс // Хакер. URL: <https://xakep.ru/2011/03/30/54897> (дата обращения: 26.02.2021).
2. Самаров В. В. Использование системы аудита операционных систем семейства Linux при проведении сертификационных испытаний программных изделий // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 1. С. 144–150. doi:10.21685/2307-4205-2021-1-14
3. Типы файловых систем для Linux. URL: <https://losst.ru/typy-fajlovyh-sistem-dlya-linux> (дата обращения: 02.04.2021).
4. В ядро Linux для ФС Ext4 включена поддержка работы без учета регистра символов. URL: <https://www.opennet.ru/opennews/art.shtml?num=50581> (дата обращения: 02.04.2021).
5. Python Release 3.4.3. URL: <https://www.python.org/downloads/release/python-343> (дата обращения: 02.04.2021).
6. Использование мета-объектного компилятора (Meta-Object Compiler, moc). URL: <http://doc.crossplatform.ru/qt/4.6.x/moc.html> (дата обращения: 02.04.2021).
7. Language Guide – Protocol Buffers – Google Developers. URL: <https://developers.google.com/protocol-buffers/docs/overview> (дата обращения: 03.04.2021).

References

1. Penguin under the hood: Audit of system events in linux. *Khaker*. (In Russ.). Available at: <https://xakep.ru/2011/03/30/54897> (accessed 26.02.2021).
2. Samarov V.V. Use of the Linux operating system audit system when conducting certification tests of software products. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2021;(1):144–150. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2021-1-14
3. *Tipy faylovykh sistem dlya Linux = Types of file systems for Linux*. (In Russ.). Available at: <https://losst.ru/typy-fajlovyh-sistem-dlya-linux> (accessed 02.04.2021).
4. *V yadro Linux dlya FS Ext4 vklyuchena podderzhka raboty bez ucheta registra simvolov = The Linux kernel for the Ext4 FS includes support for case-insensitive operation*. (In Russ.). Available at: <https://www.opennet.ru/opennews/art.shtml?num=50581> (accessed 02.04.2021).
5. *Python Release 3.4.3*. Available at: <https://www.python.org/downloads/release/python-343> (accessed 02.04.2021).
6. *Ispol'zovanie meta-ob'ektnogo kompilyatora (Meta-Object Compiler, moc) = Using a meta-Object compiler (Meta-Object Compiler, moc)*. (In Russ.). Available at: <http://doc.crossplatform.ru/qt/4.6.x/moc.html> (accessed 02.04.2021).
7. *Language Guide – Protocol Buffers – Google Developers*. Available at: <https://developers.google.com/protocol-buffers/docs/overview> (accessed 03.04.2021).

Информация об авторах / Information about the authors

Владимир Владимирович Самаров

заместитель начальника испытательной лаборатории,
ООО «16 НИИЦ»
(Россия, Московская обл., г. Мытищи,
Олимпийский просп., 29, вл. 2, 7А-4)
E-mail: samarov_vladimir@mail.ru

Vladimir V. Samarov

Deputy head of test laboratory,
LLC "16 NIITS"
(7A-4, 2, 29 Olimpiyskiy avenue, Mytitschi,
Moscow region, Russia)

Николай Кондратьевич Юрков

доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ,
заведующий кафедрой конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: yurkov_NK@mail.ru

Nikolay K. Yurkov

Doctor of technical sciences, professor,
the honoured worker of science
of the Russian Federation,
head of sub-department
of radio equipment design and production,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 20.04.2021

Поступила после рецензирования/Revised 27.04.2021

Принята к публикации/Accepted 01.05.2021