

13. Sokolov A.M., Borisov V.V. Rekurrentnye nechetkie situatsionno-pretседentnye modeli dlya operativnogo upravleniya slozhnymi tekhnicheskimi ob"ektami po pretседentam [Recurrent fuzzy situational-precedent models for operational control of complex technical objects based on precedents], *Programmnye produkty i sistemy* [Software Products and Systems], 2024, No. 4, pp. 42-51.
14. Borisov V.V., Sokolov A.M. Situatsionno-pretседentnoe upravlenie slozhnymi sistemami [Situational-precedent control of complex systems]. Smolensk: Universum, 2024, 130 p.
15. Dli M.I., Chernovalova M.V., Sokolov A.M. Postroenie nechetkikh situatsionno-pretседentnykh modeley regional'nykh ekonomicheskikh sistem s ispol'zovaniem ontologii [onstruction of fuzzy situational-precedent models of regional economic systems using ontologies], *Prikladnaya informatika* [Applied Informatics], 2025, Vol. 20, No. 2, pp. 112-125.
16. Borisov V.V., Fedulov A.S., Fedulova S.A. Podderzhka prinyatiya situativnykh resheniy na osnove sochetaniya nechetkogo situatsionnogo i kognitivnogo podkhodov [Support for making situational decisions based on a combination of fuzzy situational and cognitive approaches], *Iskusstvennyy intellekt i prinyatie resheniy* [Artificial Intelligence and Decision Making], 2025, No. 4, pp. 95-111.
17. Nikiforov A.G., Popova D.Yu., Soldatova K.V., Solov'eva O.A. Opyt obobshcheniya rezul'tatov raschetnogo issledovaniya bezlopatochnykh diffuzorov tsentrobezhnykh kompressornykh stupeney s pomoshch'yu neyronno-setevoy modeli [Experience of generalizing the results of a computational study of vaneless diffusers of centrifugal compressor stages using a neural network model], *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika* [Compressor Technology and Pneumatics], 2015, No. 4, pp. 14-17.
18. Nikiforov A.G., Popova D.Yu., Soldatova K.V. Neyrosetevye modeli politropnogo KPD i koeffitsienta napora promezhutochnoy stupeni tsentrobezhnogo kompressora [Neural network models of polytropic efficiency and pressure coefficient of the intermediate stage of a centrifugal compressor], *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika* [Compressor Technology and Pneumatics], 2015, No. 6, pp. 30-33.
19. Fedulova S.A. Programmnye sredstva intellektual'noy podderzhki prinyatiya resheniy na osnove nechetkogo situatsionno-kognitivnogo podkhoda [Software for intelligent decision support based on a fuzzy situational-cognitive approach], *Tr. XXVII Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Sistemy komp'yuternoy matematiki i ikh prilozheniya» (SKMP-2026, Smolensk, 22-23 maya 2026 g.)* [Proceedings of the XXVII International Scientific Conference "Systems of Computer Mathematics and their Applications" (SKMP-2026, Smolensk, May 22-23, 2026)], Issue 27, Vol. 1, pp. 84-86. Smolensk: Izd-vo SmolGU, 2026, 319 p.
20. Borisov V.V., Zharkov A.P., Fedulova S.A., Chernovalova M.V. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2025691523 ot 14.11.2025. Programma analiza i modelirovaniya slozhnykh protsessov na osnove nechetkogo situatsionno-kognitivnogo podkhoda [Certificate of state registration of computer program No. 2025691523 dated November 14, 2025. Program for analysis and modeling of complex processes based on a fuzzy situational-cognitive approach].

Федулова Светлана Александровна – Филиал ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ» в г. Смоленске; e-mail: svfed67@mail.ru; г. Смоленск, Россия; зав. лабораторией информатизации; старший преподаватель кафедры вычислительной техники.

Fedulova Svetlana Alexandrovna – Smolensk Branch of the National Research University "Moscow Power Engineering Institute"; e-mail: svfed67@mail.ru; Smolensk, Russia; head of the Informatization Laboratory; Senior lecturer at the Department of Computer Engineering.

УДК 621.317.08

DOI 10.18522/2311-3103-2026-3-254-264

Д.Л. Тукаев, Е.В. Крамарев, О.В. Афанасьева, Д.А. Первухин

АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ С РАЗНОТОЧНЫМИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫМИ ТРАКТАМИ

Современный этап развития методологии анализа и синтеза сложных технических систем характеризуется существенным повышением требований к скорости их проектирования без потери качества функционирования за счет применения информационных технологий проектирования сложных систем и моделирования процесса их функционирования. В этой парадигме представляется актуальным решение задачи по созданию адаптивных многоагентных систем контроля технического состояния высокоответственных объектов, использующих для измерения каждого типа контролируемого параметра систему разноточных измерительных трактов, ко-

торая обеспечит возможность оперативного выбора средства измерения, и формирования наиболее рационального алгоритма контроля, обеспечивающего требуемую эффективность контроля в условиях существенных финансовых ограничений. **Цель работы** – обоснование возможности применения разноточных измерительных трактов при формировании структуры каждого канала контроля технического состояния, обеспечивающего заданную достоверность. Для ее достижения поставлены и успешно решены следующие **задачи**: – рассмотрены современные условия проектирования систем контроля технического состояния сложных технических систем, выявлены содержащиеся факторы и тенденции развития теории проектирования, определены причины возможных недостатков перспективных систем и пути их устранения; – определен вид критерия эффективности функционирования системы в виде обобщенного показателя, полученного на основе аддитивной свертки единичных безусловных показателей достоверности контроля и весовых показателей их важности; – синтезирована структурная схема адаптивной системы на основе модели однопараметрического канала контроля с измерительными трактами разной точности и возможностью реализации известных способов повышения эффективности контроля; – проведен вычислительный эксперимент, результаты которого позволили уточнить выявленные закономерности и предложить новые рекомендации. Результаты проведенного исследования позволили разработать адаптивный алгоритм контроля многопараметрического ОК на основе многоагентной системы, моделирование поведения агентов которой осуществляется по ретроспективной информации о результатах предыдущих циклов контроля, полученным на их основе прогнозным моделям, а также реализации принципа равной достоверности и штрафных функций в случае отклонения от него.

Система контроля технического состояния; эффективность; достоверность; структура; алгоритм.

D.L. Tukeev, E.V. Kramarev, O.V. Afanaseva, D.A. Pervukhin

ADAPTIVE SYSTEM FOR CONTROLLING TECHNICAL CONDITION WITH MULTIPLE-CURRENT MEASUREMENT PATHS

The current stage of development in the methodology for analyzing and synthesizing complex technical systems is characterized by a substantial increase in requirements for their design speed without a loss of functional quality. This is achieved through the application of information technologies for designing complex systems and modeling their operation processes. Within this paradigm, solving the problem of creating adaptive multi-agent systems for monitoring the technical condition of highly critical objects appears relevant. These systems would use a set of varying-accuracy measurement channels for each type of monitored parameter. This will enable the operational selection of a measuring instrument and the formation of the most rational monitoring algorithm, ensuring the required monitoring effectiveness under significant financial constraints. The aim of this work is to substantiate the possibility of using varying-accuracy measurement channels when forming the structure of each technical condition monitoring channel to ensure a given reliability. To achieve this aim, the following tasks were set and successfully solved: – modern conditions for designing technical condition monitoring systems for complex technical systems were considered; constraining factors and trends in design theory development were identified; causes of potential shortcomings in prospective systems and ways to eliminate them were determined; – the form of the system performance criterion was defined as a generalized indicator, obtained based on an additive convolution of unit unconditional monitoring reliability indicators and weight coefficients of their importance; – a structural diagram of an adaptive system was synthesized based on a model of a single-parameter monitoring channel with measurement tracts of different accuracy and the capability to implement known methods for improving monitoring effectiveness; – a computational experiment was conducted, the results of which allowed for refining the identified patterns and proposing new recommendations. The results of the conducted research enabled the development of an adaptive algorithm for monitoring a multi-parameter Object of Control based on a multi-agent system. The behavior of its agents is modeled using retrospective information from previous monitoring cycles, predictive models based on this information, as well as the implementation of the principle of equal reliability and penalty functions in case of deviation from it.

Technical condition monitoring system; efficiency; reliability; structure; algorithm.

Введение. Необходимость создания высокоэффективных систем контроля технического состояния (СКТС) сложных технических систем (СТС), технический облик и структура которых должны определяться с высокой степенью прозрачности на ранних

стадиях жизненного цикла, обусловлена высокой стоимостью современных СТС, ошибка в оценке технического состояния (ТС) которых может привести к серьезным последствиям. Это касается как систем военного назначения однократного применения, так и объектов критической инфраструктуры государства.

Современный этап развития методологии анализа и синтеза сложных технических систем (СТС) характеризуется последовательным внедрением положений методологий системной инженерии [1–3], риск-менеджмента [4–7] и существенным повышением требований к скорости проектирования СТС без потери качества функционирования за счет применения информационных технологий [8, 9]. Результаты анализа проблемной области проектирования систем контроля технического состояния (СКТС), как контролирующих работоспособность СТС, показывают существенный прогресс, достигнутый за последнее время. К его результатам можно отнести:

- ♦ в научно-методическом обеспечении – внедрение положений системного подхода [10] и его реализаций в виде нормативно-функционального, функционально-технологического и системно-целевого подходов [11, 12] для решения задач формализации перехода от логико-семантических к структурно-функциональным моделям проектируемой системы и последующего структурно-параметрического синтеза;

- ♦ в прикладном аспекте – разработку значительного количества языков и сред моделирования, существенно упрощающих рассматриваемый процесс.

Однако необходимо отметить, что совокупность трудноформализуемых задач анализа и синтеза начальных этапов проектирования СКТС – выбора номенклатуры контролируемых параметров (КП) из числа контролепригодных (определение объема контроля), задания границ допуска работоспособности по каждому КП и выбора метода и алгоритма контроля каждого из них – остались задачами, отданными «на откуп» разработчику и не имеющими общепризнанной методики их решения [13,14]. Более того, как показывает практика проектирования отдельных СКТС:

- ♦ синтез СКТС выполняется после проектирования контролируемой СТС по «остаточному» (в плане выделяемых ресурсов) принципу, хотя соответствующие руководящие документы предполагают их параллельную разработку;

- ♦ прогнозирование остаточной работоспособности ОК не производится;

- ♦ контролируемые параметры считаются равноважными – в случае принятия решения «негоден» хотя бы по одному КП ОК считается полностью негодным;

- ♦ при формировании технических требований к СКТС в «сухом остатке» в техническом задании на разработку остаются лишь показатели ее быстродействия и надежности, не отражающие в полном объеме эффективность ее функционирования.

В этой связи представляется актуальным создание адаптивных СКТС, использующих для измерения каждого типа контролируемого параметра (напряжения, тока, частоты и др.) систему разноточных измерительных трактов, которая обеспечит возможность оперативного выбора средства измерения, и наиболее рационального алгоритма контроля, обеспечивающего заданную эффективность контроля. Применение алгоритмов функционирования многоагентных систем может существенно повысить точность и адаптивность контроля технического состояния по текущему, обеспечивая прогнозирование места и времени отказов и возможность принятия превентивных мер по их исключению.

Постановка задачи. Необходимо отметить, что в настоящее время начальные этапы синтеза СТС и СКТС проводятся в условиях информационной ограниченности, обусловленной высокой стоимостью образцов рассматриваемых СТС и процесса их испытаний, применением новых физических принципов и постоянными доработками, а также процессами модернизации и устранения рекламаций, затрудняющими применение математического аппарата теорий подобия и надежности, вследствие чего инженерные решения принимаются по малому объему статистической информации, а иногда на основе интервальных экспертных оценок, как единственного источника информации.

Единственным, на наш взгляд, выходом в сложившейся ситуации проектирования, обеспечивающим достаточно рациональное решение, является создание СКТС, как адаптивной СТС, предполагающей переход к адаптивному алгоритму функционирования на основе результатов контроля, полученных в ходе предыдущих проверок путем моделирования процесса функционирования ее «цифрового двойника», созданного на основе многоагентной системы (МАС).

Для этого необходимо решить три главные задачи:

- ♦ сформировать критерий оптимальности СКТС на основе показателей эффективности функционирования, характеризующих алгоритм и реализующую его структуру, а также показатели целевого предназначения – достоверности контроля СКТС;
- ♦ сформировать модель алгоритмическо-структурного описания СКТС как систему единичных числовых показателей объединяющих как алгоритм и структуру создаваемой СКТС, так и параметры, позволяющие формализовать в общем виде известные способы повышения эффективности контроля адаптивной СКТС;
- ♦ провести вычислительный эксперимент, подтверждающий работоспособность предложенного научно-методического аппарата.

Основная часть. Для решения многокритериальной задачи синтеза адаптивной СКТС в соответствии с положениями технико-экономического анализа [15], когда затраты на организацию и проведение контроля должны быть минимальны, а эффективность функционирования СКТС – максимальна, разработана система допущений и ограничений, позволяющая сконцентрировать усилия на первостепенных факторах:

- ♦ известна система поправочных коэффициентов, связывающих стоимость обеспечения этапов жизненного цикла СКТС (разработку, испытания, производство и др.) с совокупной стоимостью покупных изделий;
- ♦ присутствует база данных о стоимостных и технических характеристиках блоков, из которых может быть сформирован каждый измерительный тракт, который рассматривается в дальнейшем как целое, имеющий цифрового двойника в виде случайной величины результирующей погрешности (РП), причем стоимостные характеристики отдельного блока измерительного тракта (ИТ), являющегося основой СКТС, характеризуются зависимостью [16]

$$C_{ij} = A_{ij} + \frac{B_{ij}}{(\sigma_{ij})^2},$$

где A_{ij} , B_{ij} – некоторые коэффициенты; σ_{ij} – СКО погрешности;

- ♦ вероятностные характеристики случайных величин (СлВ) КП и РП известны и позволяют построить их вероятностные модели. Математический аппарат построения данных моделей на основе смеси датчиков симметричных одномодальных псевдослучайных величин выходит за рамки публикации;
- ♦ области работоспособности и принятия решения результата «годен», о которых будет идти речь ниже, согласованы;
- ♦ поскольку на результат контроля оказывает влияние необозримое количество случайных факторов, эффективность функционирования СКТС должна оцениваться вероятностно – на основе результатов статистического моделирования процесса ее функционирования. Для упрощения задача примем надежность СКТС абсолютной, что исключит из рассмотрения вопросы организации самоконтроля и получения результатов контроля «негоден», вызванных процессом старения аппаратуры, хотя на практике подобные ситуации имеют место.

Анализ существующих моделей и способов определения статистических показателей эффективности функционирования СКТС позволил остановиться на [17], в котором реализован способ определения безусловных показателей инструментальной достоверности контроля.

Для более глубокого понимания сущности проведенных исследований приведем ее описание максимально подробно.

Допустим, существует ОК, представленный на рис. 1, который может находиться как работоспособном с вероятностью $P(\Omega)$, так и неработоспособном состоянии с вероятностью $P(\bar{\Omega})$ [18]. В определенный момент времени СКСТ проводит контроль технического состояния ОК, в результате которого могут быть получены как результат «годен» с вероятностью $P^Г$ и «негоден» с вероятностью $P^{\bar{Г}}$. Однако не все результаты контроля правильные. Если ОК работоспособен, но СКТС приняла решение «негоден», это ситуация «ложный отказ», вероятность которой описывается значением $P_{\text{ЛО}}$, в противоположном случае, когда объект неработоспособен, а СКТС относит его к годным - ситуация «необнаруженный отказ», вероятность которой описывается значением $P_{\text{НО}}$.

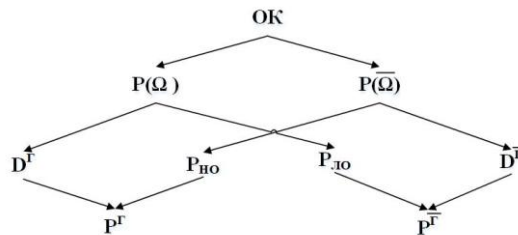


Рис. 1. Модель контроля ОК с помощью СКТС

На рис. 2 графическая реализация способа определения показателей достоверности контроля (ПДК).

Датчик измерительного тракта измеряет значение контролируемого параметра X , при необходимости преобразует его в цифровой код, возможно, усиливает и передает в устройство сравнения, в той или другой форме реализованное на «выходе» КК. В процессе измерения-преобразования-усиления-передачи случайная величина (СлВ) значения КП «обрастает» СлВ значений погрешностей соответствующий операций, в результате чего результат Z измерения КП X

$$Z = X + Y, \quad (1)$$

где Y – РП КК, определяемая как

$$Y = \sum_{i=1}^k y_i, \quad (2)$$

где y_i – СВ погрешности, вносимой i -й операцией, производимой в КК, в РИ

Работоспособность КП по параметру X задана границами области работоспособности $[X_H; X_B]$, то есть ОК работоспособен при выполнении условия

$$X \in [X_H; X_B], \quad (3)$$

и неработоспособен – в противном случае.

Графически условие (3) предполагает нахождение значения СлВ X между вертикальными линиями рис. 2

$$X = X_H; \quad (4)$$

$$X = X_B. \quad (5)$$

Устройство сравнения идентифицирует состояние ОК по местонахождению значения РИ Z относительно нижней Z_H и верхней Z_B границ поля допуска. Если результат измерения

$$Z \in [Z_H; Z_B], \quad (6)$$

СКТС принимает решение «годен», в противном случае – «негоден».

Графически условие (6) предполагает нахождение значения СлВ Y между наклонными линиями рис. 2

$$Y = Z_B - X; \quad (7)$$

$$Y = Z_H - X. \quad (8)$$

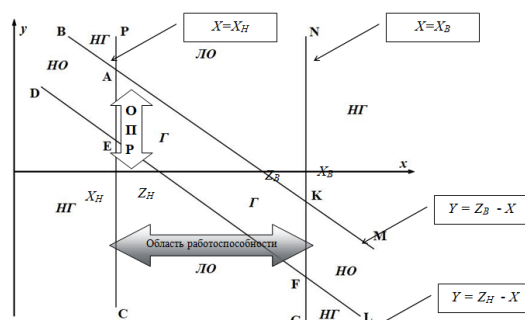


Рис. 2. Графическая реализация способа определения показателей достоверности контроля

Для преодоления препон «Антиплагиата», когда даже самоцитирование снижает оригинальность публикации, представим необходимое и неоднократно опубликованное в ведомственных трудах описание областей работоспособности, годности и принятия решения в виде табл. 1.

Таблица 1

Описание областей работоспособности, годности и принятия решения

Область	Состояние ОК	Решение СКТС	Ситуация	Обозначение
(PAB), (DEC), (GFL), (NKM)	не работоспособен	Не годен	правильное решение «негоден»	D_{NG} или $\overline{D^G}$
(DEAB), (LFKM)	не работоспособен	годен	Необнаруженный отказ	P_{HO}
(CEFG), (PAKN)	работоспособен	Не годен	ложный отказ	P_{LO}
EAKF	работоспособен	годен	правильное решение «годен»	D_G или D^G

Обобщая вышесказанное, для вычисления ПДК необходимо смоделировать процесс функционирования СКТС как двумерный вектор (X, Y) в простейшем случае независимых нормально распределенных СлВ, подсчитать количество попаданий точки (X, Y) в каждую возможную область и определить ПДК по выражению

$$ПДК = \frac{n_{non}}{N}, \quad (9)$$

где n_{non} – количество точек в области соответствующей информационной ситуации; N – число генераций.

Многолетний опыт моделирования ПДК показывает, что гнаться за высокой точностью (например, до пятого знака после запятой) не имеет смысла, поскольку начиная с четвертого знака появляется случайная методическая погрешность, обусловленная точностью генерации соответствующих законов распределения СлВ.

Для сокращения вычислительных процедур может быть использована аддитивная форма обобщенного ПДК D_{OB}

$$D_{OB} = \beta_1 \overline{D^F} + \beta_2 \overline{D^{\bar{F}}} + \beta_3 \overline{P_{HO}} + \beta_4 \overline{P_{LO}},$$

где $\overline{D^F}$, $\overline{D^{\bar{F}}}$, $\overline{P_{HO}}$, $\overline{P_{LO}}$ – нормированные значения соответствующих ПДК;

$\beta_1 - \beta_4$ – коэффициенты уровня значимости, определяемые методами экспертных процедур.

Нормирование осуществлено по зависимостям:

$$\blacklozenge \quad \bar{k}_i = \frac{k_i - k_i^{\min}}{k_i^{\max} - k_i^{\min}} - \text{если желательным является увеличение численного значения}$$

соответствующего показателя;

$$\blacklozenge \quad \bar{k}_i = \frac{k_i^{\max} - k_i}{k_i^{\max} - k_i^{\min}} - \text{если желательным является уменьшение численного значения}$$

соответствующего показателя.

Вычисление значений коэффициентов уровня значимости, определяемых методами экспертных процедур, является темой отдельной статьи, разрабатываемой в настоящее время. Предполагается для решения этой задачи использование композиции методов технико-экономического анализа, парных сравнений и теории чувствительности. В отдельных случаях, когда цена результата контроля «необнаруженный отказ» может приводить к негативным последствиям, сопоставимым со стоимостью ОК и выше, можно порекомендовать эффективность функционирования СКТС оценивать обобщенным показателем вероятности ошибочных решений при контроле ТС $P_{OШ}$

$$P_{OШ} = \beta_3 P_{HO} + \beta_4 P_{LO}; \quad \beta_3 \gg \beta_4.$$

Решение второй задачи, поставленной в начале статьи, предполагает исследование существующих методов повышения эффективности функционирования СКТС и оценку возможности их реализации в ее структуре. В итоге к реализуемым в синтезируемой СТС отнесены:

◆ многократное измерение КП с последующим осреднением. В статье предлагается модернизировать данную процедуру введением понятия «неравнозначности измерений», когда более позднее измерение, выполненное более точным ИТ, имеет более высокую «цену», которая определяется большим весом в аддитивной свертке;

◆ применение упрощенной мажоритарной логики для каналов с разноточными ИТ, когда при наличии результата «грубого» канала «негоден» производится повторное измерение более точным каналом и при наличии результата «годен», он принимается за основу.

В соответствии с этими соображениями и используя представленную в статье [19] структуру как прототип, на рис. 3 визуализировано графическое представление модели алгоритмическо-структурного описания СКТС $S_{СКТС}$

$$S_{СКТС} = F(m_j, n_j, M, a, b, c, K). \quad (9)$$

Основные параметры модели, являющиеся варьируемыми в процессе вычислительного эксперимента, а в последующем – изменяемыми в результате функционирования многоагентной системы, представлены в табл. 2.

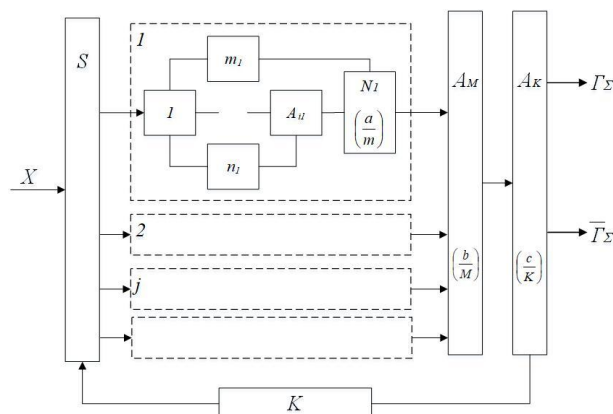


Рис. 3. Графическое представление модели алгоритмического-структурного описания КК СКТС

Таблица 2

Основные параметры модели алгоритмического-структурного описания СКТС

Обозначение		Физический смысл
m_i	-	число повторных измерений в j -м ИТ
n_i	-	число повторных циклов контроля в j -м ИТ
M	-	число разноточных ИТ в j -м КК
K	-	общее число циклов контроля в масштабе j -го КК
a, b, c	-	допустимое количество решений "годен" соответственно при m_j циклах работы отдельного ИТ, при получении решений от каждого из M трактов, при k циклах работы всего КК

Представленный в таблице набор параметров может служить основой для проведения вычислительных экспериментов по внедрению разноточных измерений в практику проектирования.

Эксперименты. Планирование вычислительного эксперимента осуществлено в соответствии с [20] в вычислительной среде Mathcad 15 в следующей последовательности:

- ♦ проверка работоспособности процедуры вычисления единичных безусловных ПДК для однопараметрического КК при варьируемых значениях отношения среднеквадратического отклонения (СКО) КП и результирующей погрешности (РП) s , ширины ОР $z1$ и ОНР «годен» $z2$, а также проверка сопоставимости результатов моделирования способов повышения эффективности функционирования систем контроля по процедурам определения ПДК для методов осреднения результатов многократного измерения и мажоритарной обработки РИ;

- ♦ получение значений безусловных ПДК однопараметрического КК с разноточными ИТ.

Вычислительные эксперименты проведены в предположении о:

- ♦ нормальности законов распределения КП и РП, вносимой элементами КК; отсутствия систематической погрешности КК;
- ♦ симметричности и согласованности областей работоспособности и принятия решения.

Дискуссия. Анализ результатов первого этапа эксперимента показал высокую степень сходимости. Расхождения, возникающие на уровне 3-4 знака после запятой при числе генераций $N = 5000$, обусловлены статистической ошибкой воспроизводимости датчиков СлВ при использовании метода статистических испытаний, что порождает необходимость проведения дополнительных вычислительных экспериментов по исследованию качества генераторов СлВ. Полученные результаты позволили свести в базу данных зависимости табулированных значений ПДК от значений параметров выражения (9).

Второй этап эксперимента заключался в установлении закономерностей при применении разноточных (назовем их «точный» и «грубый») измерительных трактов и их аддитивной свертке с различными коэффициентами весомости (для проверки работоспособности процедуры – 0,7 для «точного» и 0,3 для «грубого»). Анализ значений ПДК показал, что получаемые результаты ПДК несколько хуже, чем при использовании двух одинаковых «точных» каналов, однако намного лучше, чем при использовании одного «точного». Этот вывод открывает широкий простор для решения оптимизационных задач структурно-параметрического синтеза СКТС. Кроме того, установлено, что:

- ♦ количество параллельных измерительных трактов целесообразно ограничить тремя, поскольку дальнейшее увеличение их количества не приводит к существенному снижению количества ошибок контроля;

- ♦ перспективными являются новые алгоритмы последовательного контроля, когда измерение осуществляется сначала «грубым» ИТ, а потом – при наличии результата «негоден» – «точным» и результат последнего считается решающим.

Выводы. Предложенный научно-методический аппарат в виде полученного авто-рами критерия оптимальности эффективности функционирования СКТС на основе аддитивной свертки единичных безусловных показателей достоверности контроля и весовых показателей их важности, информационно-статистического метода получения значений ПДК и структурной схемы однопараметрического канала контроля с измерительными трактами разной точности, реализующей весь спектр инструментальных и информационных методов повышения эффективности контроля, являются логичным продолжением исследований в области теории автоматического контроля.

Полученные результаты вычислительных экспериментов свидетельствуют о возможности реализации данной структуры при проектировании перспективных адаптивных СКТС.

Результаты проведенного исследования позволяют разработать адаптивный алгоритм контроля многопараметрического ОК на основе цифрового двойника СКТС – много-агентной системы, моделирование поведения агентов которой будет осуществляться по ретроспективной информации о результатах предыдущих циклов контроля, полученным на их основе прогнозным моделям КП, реализации принципа равной достоверности [21] для всех каналов контроля и штрафных функций в случае отклонения от него.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ Р 59990 – 2022. Системная инженерия. Системный анализ процесса оценки и контроля проекта.
2. *Косяков А., Свит У.Н., Сеймур С.Д., Бимер С.М.* Системная инженерия: принципы и практика: учеб. пособие: пер. с англ. под ред. В.К. Батоврина. – 2-е изд. – М.: ДМК Пресс, 2017. – 624 с. – URL: <https://lib.biblioclub.ru/index.php?page=book&id=577553> (дата обращения: 16.12.2024). – ISBN 978-5-97060-464-9.
3. *Заманский Б.И., Кирдяшов Ф.Г.* Основы системной инженерии: учебник. – М.: Изд. Дом НИТУ «МИСиС», 2019. – 80 с. – ISBN 978-5-907061-86-6. – URL: <https://znanium.com/catalog/product/1239522> (дата обращения: 16.12.2024).
4. ГОСТ Р ИСО 31000-2019. Менеджмент риска. Принципы и руководство.
5. ГОСТ Р ИСО/МЭК 30010-2011 Менеджмент риска. Методы оценки риска.
6. ГОСТ Р 58771-2019. Менеджмент риска. Технологии оценки риска.
7. ГОСТ Р 59991–2022. Системная инженерия. Системный анализ процесса управления рисками для системы.
8. *Лаврищева Е.М.* Программная инженерия. Тема 3. Базовые основы программной инженерии: учебно-методическое пособие. – М.: МФТИ, 2016. – 51 с.
9. *Павлов А.Н.* Эффективное управление проектами на основе стандартов PMI PMBOK® 7th Edition и PMBOK® 6th Edition. – Электрон. изд. – М.: Лаборатория знаний, 2023. – 371 с.
10. *Садовский В.Н.* Системный подход и общая теория систем: статус, основные проблемы и перспективы развития. – М.: Наука, 1980.
11. *Баринов В.А.* Организационное проектирование: учебник. – М.: ИНФРА-М, 2019. – 384 с. – (Учебники для программы MBA). – ISBN 978-5-16-103023-3. – URL: <https://new.znanium.com/catalog/product/1018366>.

12. Бахмарева Н.В. Оценка эффективности организационных структур управления // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2010. – № 6. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-effektivnosti-organizatsionnyh-struktur-upravleniya>.
13. РМГ 63–2003. ГСИ. Обеспечение эффективности измерений при управлении технологическими процессами. Метрологическая экспертиза технической документации.
14. ГОСТ Р 8.563–2009. ГСИ. Методики (методы) измерения.
15. Поздеев В.Л. Техничко-экономический анализ как инструмент принятия эффективных управленческих решений // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2019. – Т. 2, № 6 (11). – С. 300-305.
16. Агеев В.М., Павлова Н.В. Приборные комплексы летательных аппаратов и их проектирование. – М.: Машиностроение, 1990. – 432 с.
17. Свидетельство на полезную модель № 24886. Российская Федерация, МПК G06F15/46. Устройство для решения задачи оценки эффективности контроля ... / Д.Л. Тукеев, А.Е. Филлюстин, И.Н. Филатов. – 4 с.
18. Гаскаров Д.В., Голинкевич Т.А., Мозгалецкий Д.В. Прогнозирование технического состояния и надежности радиоэлектронной аппаратуры. – М.: Советское радио, 1974. – 224 с.
19. Тукеев Д.Л., Филатов И.Н., Филлюстин А.Е., и др. Устройство многопараметрического контроля сложных технических объектов. – М.: Российское агентство по патентам и товарным знакам. Свидетельство на полезную модель № 25617, 2002.
20. Конюхов В.М., Чекалин А.Н., Конюхов И.В. Численное моделирование и метод планирования вычислительных экспериментов. – Казань: Казан. гос. ун-т, 2016. – 31 с.
21. Тукеев Д.Л., Зайцев Р.В., Крамарев Е.В. Алгоритмическо-структурные модели систем контроля технического состояния // Тр. Михайловской военной артиллерийской академии № 1 январь-июнь 2023 г. – СПб.: МВАА, 2023. – С. 176-180.

REFERENCES

1. GOST R 59990 – 2022. Sistemnaya inzheneriya. Sistemnyy analiz protsessa otsenki i kontrolya proekta [GOST R 59990–2022. Systems Engineering. Systems Analysis of the Project Assessment and Control Process].
2. Kosyakov A., Svit U.N., Seymour S.D., Bimer S.M. Sistemnaya inzheneriya: printsipy i praktika: ucheb. posobie [Systems Engineering: Principles and Practice]: transl. from Engl. ed. by. V.K. Batovrina. 2nd ed. Moscow: DMK Press, 2017, 624 p. Available at: <https://lib.biblioclub.ru/index.php?page=book&id=577553> (accessed 16 December 2024). ISBN 978-5-97060-464-9.
3. Zamanskiy B.I., Kiryashov F.G. Osnovy sistemnoy inzhenerii: uchebnik [Fundamentals of systems engineering: textbook]. Moscow: Izd. Dom NITU «MISiS», 2019, 80 p. ISBN 978-5-907061-86-6. Available at: <https://znanium.com/catalog/product/1239522> (accessed 16 December 2024).
4. GOST R ISO 31000-2019. Menedzhment riska. Printsipy i rukovodstvo [GOST R ISO 31000-2019. Risk Management. Principles and Guidelines].
5. GOST R ISO/MEK 30010-2011 Menedzhment riska. Metody otsenki riska [GOST R ISO/IEC 30010-2011. Risk Management. Risk Assessment Methods].
6. GOST R 58771-2019. Menedzhment riska. Tekhnologii otsenki riska [GOST R 58771-2019. Risk Management. Risk Assessment Technologies].
7. GOST R 59991–2022. Sistemnaya inzheneriya. Sistemnyy analiz protsessa upravleniya riskami dlya sistemy [GOST R 59991–2022. Systems Engineering. Systems Analysis of the Risk Management Process for a System].
8. Lavrishcheva E.M. Programmnaya inzheneriya. Tema 3. Bazovye osnovy programmnoy inzhenerii: uchebno-metodicheskoe posobie [Software engineering. Topic 3. Fundamentals of software engineering: study guide]. Moscow: MFTI, 2016, 51 p.
9. Pavlov A.N. Effektivnoe upravlenie proektami na osnove standartov PMI PMBOK® 7th Edition i PMBOK® 6th Edition [Effective project management based on PMI PMBOK® 7th Edition and PMBOK® 6th Edition standards]. Electronic ed. Moscow: Laboratoriya znaniy, 2023, 371 p.
10. Sadovskiy V.N. Sistemnyy podkhod i obshchaya teoriya sistem: status, osnovnye problemy i perspektivy razvitiya [Systems approach and general systems theory: status, main problems and development prospects]. Moscow: Nauka, 1980.
11. Barinov V.A. Organizatsionnoe proektirovanie: uchebnik [Organizational design: textbook]. Moscow: INFRA-M, 2019, 384 p. ISBN 978-5-16-103023-3. Available at: <https://new.znanium.com/catalog/product/1018366>.
12. Bakhmareva N.V. Otsenka effektivnosti organizatsionnykh struktur upravleniya [Evaluation of the effectiveness of organizational management structures], *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavтики* [Actual Problems of Aviation and Cosmonautics], 2010, No. 6. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-effektivnosti-organizatsionnyh-struktur-upravleniya>.

13. RMG 63–2003. GSI. Obespechenie effektivnosti izmereniy pri upravlenii tekhnologicheskimi protsessami. Metrologicheskaya ekspertiza tekhnicheskoy dokumentatsii [RMG 63–2003. GSI. Ensuring the Efficiency of Measurements in Technological Process Control. Metrological Expertise of Technical Documentation].
14. GOST R 8.563–2009. GSI. Metodiki (metody) izmereniya [GOST R 8.563–2009. GSI. Measurement Methods (Techniques)].
15. Pozdeev V.L. Tekhniko-ekonomicheskiy analiz kak instrument prinyatiya effektivnykh upravlencheskikh resheniy [Technical and economic analysis as a tool for making effective management decisions], *Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika* [Current areas of scientific research in the 21st century: theory and practice], 2019, Vol. 2, No. 6 (11), pp. 300-305.
16. Ageev V.M., Pavlova N.V. Pribornye komplekсы letatel'nykh apparatov i ikh proektirovanie [Aircraft instrumentation systems and their design]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1990, 432 p.
17. Tukeyev D.L., Filyustin A.E., Filatov I.N. Svidetel'stvo na poleznuyu model' № 24886. Rossiyskaya Federatsiya, MPK G06F15/46. Ustroystvo dlya resheniya zadachi otsenki effektivnosti kontrolya ... [Utility Model Certificate No. 24886. Russian Federation, IPC G06F15/46. Device for solving the problem of assessing the effectiveness of control ...], 4 p.
18. Gaskarov D.V., Golinkevich T.A., Mozgalevskiy D.V. Prognozirovaniye tekhnicheskogo sostoyaniya i nadezhnosti radioelektronnoy apparatury [Forecasting the technical condition and reliability of electronic equipment]. Moscow: Sovetskoye radio, 1974, 224 p.
19. Tukeyev D.L., Filatov I.N., Filyustin A.E., i dr. Ustroystvo mnogoparametricheskogo kontrolya slozhnykh tekhnicheskikh ob"ektov [Device for multiparameter control of complex technical objects]. Moscow: Rossiyskoye agentstvo po patentam i tovarnym znakam. Svidetel'stvo na poleznuyu model' No. 25617, 2002.
20. Konyukhov V.M., Chekalin A.N., Konyukhov I.V. Chislennoye modelirovaniye i metod planirovaniya vychislitel'nykh eksperimentov [Numerical modeling and planning method for computational experiments]. Kazan': Kazan. gos. un-t, 2016, 31 p.
21. Tukeyev D.L., Zaytsev R.V., Kramarev E.V. Algoritmicheskoye-strukturnyye modeli sistem kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya [Algorithmic and structural models of technical condition monitoring systems], *Tr. Mikhaylovskoy voennoy artilleriyskoy akademii № 1 yanvar'-iyun' 2023 g.* [Proceedings of the Mikhailovsky Military Artillery Academy, No. 1, January-June 2023]. St. Petersburg: MVAA, 2023, pp. 176-180.

Тукеев Дмитрий Леонидович – Михайловская военная артиллерийская академия; e-mail: dimleo@inbox.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +79119393902; д.т.н.; доцент.

Крамарев Евгений Викторович – Михайловская военная артиллерийская академия; e-mail: kramar-ev@yandex.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +79378271428; адъюнкт.

Афанасьева Ольга Владимировна – Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения; e-mail: ovaf72@guap.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +79214258121; к.т.н.; доцент кафедры высшей математики и механики.

Первухин Дмитрий Анатольевич – Михайловская военная артиллерийская академия; e-mail: pervuchin@rambler.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +79217867688; д.т.н.; профессор; старший научный сотрудник 3 НИО НИЦ (РВиА).

Tukeev Dmitry Leonidovich – Mikhailovskaya Artillery Academy; e-mail: dimleo@inbox.ru; St. Petersburg, Russia; phone: +79119393902; dr. of eng. sc.; associate professor;

Kramarev Evgeny Viktorovich – Mikhailovskaya Military Artillery Academy; e-mail: kramar-ev@yandex.ru; St. Petersburg, Russia; phone: +79378271428; postgraduate student.

Afanaseva Olga Vladimirovna – St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation; e-mail: ovaf72@guap.ru; St. Petersburg, Russia; phone: +79214258121; cand. of eng. sc.; associate professor at the Department Higher Mathematics and Mechanics.

Pervukhin Dmitry Anatolyevich – Mikhaylovskaya Artillery Academy; e-mail: pervuchin@rambler.ru; St. Petersburg, Russia; phone: +79217867688; dr. of eng. sc.; senior researcher, 3rd Scientific Research Institute, Scientific Research Center (RViA).