

Научная статья
УДК 004.9:623.1

Формирование обобщенных параметров состояния сложных военно-технических систем на основе полиномиальной свертки контролируемых телеметрических параметров

Александр Васильевич Тимошенко, Георгий Николаевич Мальцев,
Андрей Николаевич Калюта

Аннотация. Обоснован подход к формированию обобщенных параметров технического состояния сложных технических систем при их эксплуатации и диагностировании. Рассмотрено формирование обобщенных параметров технического состояния сложной технической системы в виде полиномиальной свертки контролируемых технических и функциональных параметров. В качестве базисных полиномов используются полиномы Колмогорова-Габора второго порядка. Свертка исходных значений контролируемых параметров при формировании значения обобщенного параметра осуществляется с использованием настраиваемых коэффициентов. Показана возможность настройки коэффициентов для достижения порогового характера зависимости обобщенного параметра от критических параметров технического состояния контролируемой системы.

Ключевые слова: техническое диагностирование; прогноз; телеметрия; надежность; алгоритм оптимизации; полином Колмогорова-Габора

Для цитирования: Тимошенко А.В., Мальцев Г.Н., Калюта А.Н. Формирование обобщенных параметров состояния сложных военно-технических систем на основе полиномиальной свертки контролируемых телеметрических параметров // Вооружение и экономика. 2024. №2(68). С. 43-50.

Original article

Formation of Generalized Parameters of Complex Military-Technical Systems State on the Basis of Polynomial Convolution of Monitored Telemetric Parameters

Aleksandr V. Timoshenko, Georgii N. Maltsev, Andrei N. Kaliuta

Abstract. The article substantiates an approach to the generalized parameters generation of the complex technical systems state in their operation and diagnosis. The parameters generation of complex system technical state in the form of the controlled technical and functional parameters polynomial convolution is considered. The Kolmogorov-Gabor polynomials of the second order are used as basic polynomials. The initial values convolution of the controlled parameters in the course of parameter value generation is carried out with the use of adjustable coefficients. The coefficients adjustability for the threshold nature dependence achievement of the generalized parameter on the critical parameters of the controlled system technical state is shown.

Keywords: technical diagnostics; prediction; telemetry; reliability; optimization algorithm; Kolmogorov-Gabor polynomial

For citation: Timoshenko A.V., Maltsev G.N., Kaliuta A.N. Formation of Generalized Parameters of Complex Military-Technical Systems State on the Basis of Polynomial Convolution of Monitored Telemetric Parameters // Armament and Economics. 2024. No.2(68). P. 43-50.

Введение

Диагностика и прогнозирование надежности является современным направлением в развитии теории и практики эксплуатации сложных технических систем (СТС)¹. Это в полной мере относится к эксплуатации таких СТС, как космические комплексы, радиолокационные комплексы обзора пространства, информационно-управляющие комплексы². В реальных условиях функционирования СТС их техническое состояние и текущие функциональные

¹ Александровская Л.Н., Круглов В.И., Кузнецов А.Г., Кузнецов В.А., Кутин А.А., Шолом А.М. Теоретические основы испытаний и экспериментальная отработка сложных технических систем: учеб. пособие. М.: Логос, 2003. 736 с.; с м. также [1].

² Современная телеметрия в теории и на практике: учеб. пособие / Под ред. А.В. Назарова. СПб.: Наука и техника, 2007. 667 с.; с м. также [2].

возможности могут изменяться под влиянием эксплуатационных факторов и внешних воздействий. В этих условиях анализ текущего технического состояния СТС и его прогнозирование необходимы для своевременного принятия мер по поддержанию готовности к применению и функциональных возможностей СТС на требуемом уровне, а также планирования последующего применения по назначению.

В состав современных СТС входят датчики контроля технических и функциональных параметров и средства технического диагностирования, образующие встроенные системы диагностического контроля. С их помощью осуществляется оперативный контроль функционирования подсистем СТС, однако оценка технического состояния СТС в целом и обнаружение неисправностей носит событийный характер, и обнаружение неисправности в случае, если она имеет критический характер для функционирования СТС. В связи с этим становится актуальной задача формирования обобщенных параметров технического состояния СТС в целом, позволяющих контролировать его изменения и принимать решения по управлению техническим состоянием СТС. В настоящей статье рассмотрен подход к формированию обобщенных параметров технического состояния СТС на основе полиномиальной свертки контролируемых параметров.

Обоснование подхода к формированию обобщенных параметров технического состояния сложных технических систем

Важнейшими задачами, решаемыми комплексами управления СТС на этапе их эксплуатации, являются задачи технического диагностирования, включающие задачи контроля и прогнозирования технического состояния, поиска места и причин неисправностей [3]. При рассмотрении вопросов технического диагностирования СТС под контролируруемыми параметрами будем понимать данные контроля параметров подсистем (аппаратных и программных комплексов) сложной системы с помощью встроенных средств контроля, которые поступают в систему обработки и технического диагностирования. Это могут быть «приборные» параметры, поступающие от аппаратных комплексов, и «программные» параметры, формируемые вычислительными комплексами³.

Если в качестве сложной системы выступает бортовая система, то контролируемые телеметрические параметры образуют бортовую телеметрию, которая может обрабатываться автономно или передаваться на наземные средства обработки и технического диагностирования. Если в качестве сложной системы выступает наземная система, то контролируемые параметры образуют наземную телеметрию, которая обрабатывается встроенными средствами обработки и технического диагностирования.

Задача контроля технического состояния СТС характеризуется следующими проблемными вопросами:

- значительной размерностью ввиду большого количества контролируемых параметров и возможных состояний СТС;
- косвенным характером контроля функциональных возможностей и надежности СТС по большинству контролируемых параметров;
- невозможностью прогнозирования большинства контролируемых параметров и связанных с ними параметров функционирования СТС на длительное время упреждения прогноза.

Особенностью процесса технического диагностирования СТС является необходимость использования обобщенных параметров их технического состояния в целом в сочетании с расширением множества учитываемых технических состояний. Использование обобщенных параметров необходимо для сопоставления результатов диагностического контроля с различными множествами технических состояний и принятия решений по управлению техническим состоянием и применению СТС с требуемой эффективностью.

³ Черкесов Г.Н. Надежность аппаратно-программных комплексов: учеб. пособие. М.: Питер, 2005. 478 с.; с м. также [4].

На рисунке 1 представлен пример обобщенного параметра технического состояния Z , изменяющегося для дискретных отсчетов времени k в пределах шкалы от 0 до $L_{\text{шк}}$. Обобщенный параметр принимает значения в соответствии с допусками $[d_1, d_2]$ при штатном функционировании (ШФ) технической системы, в соответствии с допусками (d_3, d_4) и (d_5, d_6) – при нахождении технической системы в частично-работоспособном состоянии (ЧРС), в соответствии с допусками $[0, d_3]$ и $[d_6, L_{\text{шк}}]$ – при неработоспособном состоянии (НС) технической системы. В данном случае традиционно учитываемые виды работоспособного и неработоспособного технических состояний дополнены видом частично работоспособного технического состояния. Учет частично работоспособного состояния соответствует практике эксплуатации СТС, когда техническая система способна выполнять функциональные задачи по предназначению с допустимыми ограничениями⁴.

При контроле технического состояния СТС различного назначения переход от множества отдельных контролируемых параметров к обобщенным параметрам, характеризующим техническое состояние технической системы в целом, является общей задачей в комплексе задач технического диагностирования [1; 5]. Системы контроля и диагностирования технического состояния представляют собой информационную часть замкнутой системы (контура) управления техническим состоянием СТС, выступающей в качестве объекта диагностирования⁵. На рисунке 2 показана трехуровневая иерархическая схема принятия решения о техническом состоянии СТС.

Приведенная схема отражает иерархическое построение СТС и систем их диагностического контроля. Контролируемые параметры элементов подсистем СТС образуют нижний уровень 3, обобщенные параметры технического состояния подсистем СТС образуют промежуточный уровень 2, а обобщенные параметры технического состояния СТС в целом образуют верхний уровень 1. По обобщенным параметрам верхнего уровня, характеризующего СТС в целом, принимаются решения по управлению их техническим состоянием и применению по назначению. В качестве обобщенных параметров могут выступать: результаты различного рода преобразований значений контролируемых параметров, характеристики подсистем СТС, непосредственно номер вида технического состояния. Общими требованиями к выбору обобщенных параметров являются адекватность характеристики технического состояния СТС в целом и возможность прогнозирования на интересующих временных интервалах.

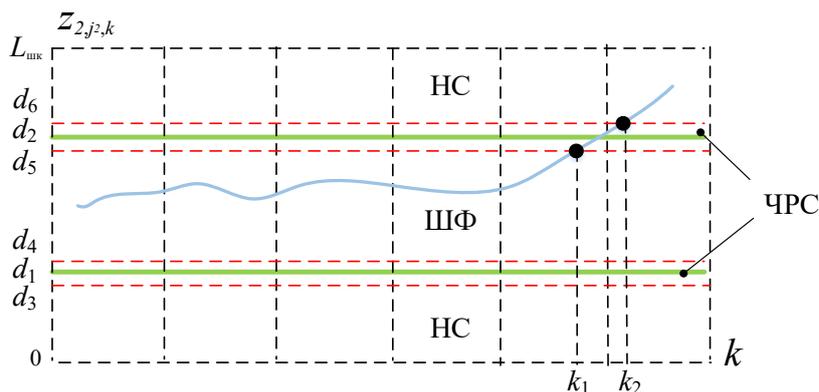


Рисунок 1 – Пример изменения обобщенного параметра технического состояния

⁴ Васильев В.В., Галаев С.А., Лесниченко Р.И., Мезенцев А.В., Потюпкин А.Ю., Рудаев С.А. Методологические основы испытаний сложных технических систем: учеб. пособие. М.: ВА РВВН им. Петра Великого, 2013. 286 с.

⁵ Теоретические основы испытаний... Указ. соч.; см. также [6].

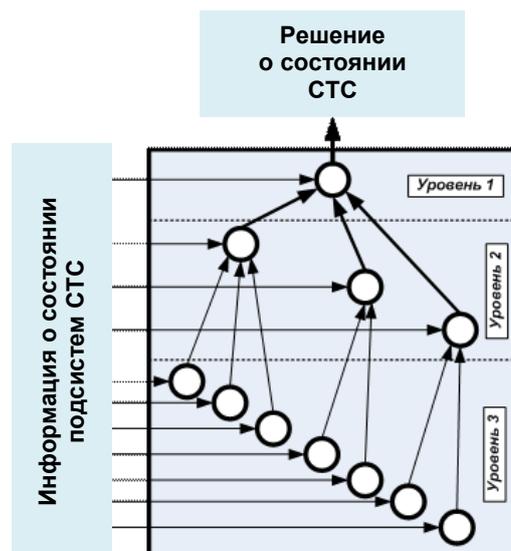


Рисунок 2 – Иерархическая структура принятия решения о техническом состоянии СТС

В общем случае обобщенные параметры технического состояния СТС должны удовлетворять требованиям как разработчиков, так и операторов внешних систем управления СТС. На уровне обобщенных параметров технического состояния СТС в целом найденный обобщенный параметр сравнивается с полем допуска, и по результатам сравнения определяется вид текущего технического состояния СТС.

При обработке телеметрической информации используется несколько подходов к формированию обобщенных параметров контролируемых технических систем [7; 8]. Их можно разделить на две большие группы: методы, основанные на анализе физических процессов функционирования СТС, и методы, основанные на формальных математических преобразованиях исходных параметров СТС. При этом большинство из подходов к формированию обобщенных параметров ориентированы на оценку технического состояния конкретных технических систем и основаны на анализе физических процессов их функционирования. Такие обобщенные параметры не обладают универсальностью, необходимой для решения задач оценки и прогнозирования технического состояния СТС, включающих большое число разнородных подсистем, с целью управления их техническим состоянием и планирования применения.

В качестве универсального подхода к формированию обобщенных параметров СТС может рассматриваться подход, основанный на формальных математических преобразованиях исходных параметров СТС, а в качестве универсальных математических преобразований – полиномиальные преобразования, в частности, полиномиальная свертка, к которой сводится формирование обобщенного параметра из множества исходных частных параметров. При этом выбор базиса используемых полиномов может осуществляться с учетом особенностей анализируемой СТС, физических процессов и конкретных условий ее функционирования и решаемых задач технического диагностирования.

В иерархической схеме принятия решения о техническом состоянии СТС формирование обобщенных параметров технического состояния с использованием полиномиальных преобразований может осуществляться на уровне 2 при формировании обобщенных параметров технического состояния подсистем СТС и на уровне 1 при формировании обобщенных параметров технического состояния СТС в целом. Далее рассматривается формирование обобщенных параметров технического состояния СТС на основе полиномиальной свертки контролируемых параметров бортовой (в случае космических средств) или наземной (в случае наземных средств) телеметрии с использованием полиномов Колмогорова-Габо́ра.

Формирование обобщенных параметров технического состояния с использованием полиномов Колмогорова-Габора

Для формирования обобщенных параметров технического состояния СТС на основе полиномиальной свертки контролируемых параметров могут быть использованы полиномы Колмогорова-Габора второго порядка. Известно их использование для решения задачи синтеза универсального оптимального нелинейного предсказывающего фильтра с самонастройкой, как фильтра, реализующего алгоритм предсказания будущего значения некоторой функции времени по её предыстории путём нахождения оптимальных весовых коэффициентов расширенного оператора предсказания [9]. Частным случаем данного алгоритма предсказания является алгоритм прогнозирования технического состояния СТС по обобщенному параметру.

Полиномы Колмогорова-Габора представляют собой функциональный ряд Вольтерры и описывают отношение между зависимой переменной y и свободными переменными x_1, x_2, \dots, x_n в виде:

$$y(x_1, x_2, \dots, x_n) = a_0 + \sum_{i=1}^n a_{1i} x_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=i}^n a_{2ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n \sum_{j=i}^n \sum_{k=j}^n a_{3ijk} x_i x_j x_k + \dots, \quad (1)$$

где $a_0, a_{1i}, a_{2ij}, a_{3ijk}$ – коэффициенты полиномов нулевого, первого, второго и третьего порядка соответственно.

Свойством разложения вида (1) является то, что при увеличении степени разложения точность приближения им функции $y(x_1, x_2, \dots, x_n)$ сначала возрастает, а потом убывает. В момент, когда точность максимальна, процесс усложнения полинома заканчивается. В большинстве случаев оказывается достаточно использовать разложение на полиномы Колмогорова-Габора до второй степени включительно. Благодаря этому свойству, разложение вида (1) получает распространение при решении различных задач обработки информации. Полиномы Колмогорова-Габора используются в качестве метода группового учета аргументов для прогнозирования нестационарных случайных процессов при обработке измерений и моделирования динамических рядов корреляционного анализа при структурной идентификации объектов [10; 11]. Важными достоинствами использования полиномов Колмогорова-Габора для формирования обобщенных параметров технического состояния СТС и унифицированного описания процессов их функционирования являются, с одной стороны, относительная простота и малое количество компонентов, с другой стороны, возможность учета нелинейности и взаимного влияния параметров СТС [9; 12].

Пусть имеется множество измеренных и, возможно, прошедших предварительную обработку значений m исходных контролируемых параметров $z_{0i}, i = 1, 2, \dots, m$. Их объединение при формировании обобщенного параметра z_1 с использованием полиномов Колмогорова-Габора второй степени осуществляется в соответствии с выражением:

$$z_1(z_{01}, z_{02}, \dots, z_{0m}) = a_0 + \sum_{i=1}^m a_{1i} z_{0i} + \sum_{i=1}^m \sum_{j=r_1}^m a_{2ij} z_{0i} z_{0j}, \quad (2)$$

где a_0, a_{1i}, a_{2ij} – коэффициенты полиномов нулевого, первого и второго порядка соответственно, с помощью которых осуществляется свертка значений исходных параметров $z_{0i}, i = 1, 2, \dots, m$, при формировании обобщенного параметра z_1 .

Формализация обобщенных параметров z_1 на основе полиномов Колмогорова-Габора в виде (2) предполагает обучение модели. В процессе обучения модели необходимо определить оптимальные значения коэффициентов a_0, a_{1i}, a_{2ij} и оптимальный состав переменных $z_{0i}, i, j = 1, 2, \dots, m$, что позволяет снизить размерность задачи аппроксимации сложных нелинейных зависимостей. Состав учитываемых параметров определяется матрицей преобразования, отражающей их взаимосвязь и степень влияния на техническое состояние подсистемы СТС или СТС в целом. На более высоких уровнях иерархического построения СТС в качестве исходных параметров при формировании обобщенных параметров выступают обобщенные параметры более низкого уровня.

Проведенный анализ показывает, что техническое состояние СТС обычно характеризуется несколькими обобщенными параметрами. Важными свойствами обобщенных параметров технического состояния СТС, формируемых рассмотренным методом с использованием полиномиальных преобразований и обучения, являются:

- соответствие значений обобщенного параметра реальному техническому состоянию СТС с высокой доверительной вероятностью;
- медленно меняющийся характер обобщенного параметра, допускающий возможность прогнозирования его значений на длительное время упреждения прогноза;
- распределение значений обобщенного параметра в пределах допусков, соответствующих техническому состоянию СТС, близкому к нормальному;
- возможность определения моментов времени, соответствующих изменению технического состояния СТС (на рисунке 1 – моменты дискретных отсчетов времени k_1 и k_2);
- возможность определения моментов времени, соответствующих снижению вероятности безотказной работы СТС ниже допустимого уровня.

Отмеченные свойства позволяют использовать обобщенные параметры, формализованные на основе полиномов Колмогорова-Габора, для решения задач прогнозирования надежности СТС на этапах поддержания их готовности и подготовки к применению. При этом имеется возможность настройки коэффициентов используемых полиномов и для достижения порогового характера зависимости обобщенного параметра от времени при изменении критических параметров технического состояния контролируемой системы. Тем самым обеспечивается соответствие значений обобщенного параметра состоянию СТС и возможность задания пороговых уровней и допусков для принятия решений о состоянии СТС по значениям обобщенных параметров.

В общем случае задача формирования обобщенных параметров технического состояния СТС на основе полиномов Колмогорова-Габора является многопараметрической и многокритериальной задачей оптимизации вследствие значительного количества настраиваемых параметров (весовых коэффициентов) преобразования значений контролируемых технических и функциональных параметров в обобщенные параметры подсистем СТС и СТС в целом, а также множества разнородных требований, предъявляемых к характеристикам получаемых обобщенных параметров технического состояния СТС. Это обуславливает ее решение методами дискретной оптимизации с использованием моделей процесса контроля технического состояния и технического диагностирования СТС.

На рисунке 3а представлены: требуемый вид изменения обобщенного параметра Z технического состояния реальной подсистемы СТС в зависимости от номера временного отсчета k при изменении критических параметров технического состояния в виде пороговой характеристики (кривая 1), определяемый набором допусков на параметры ее технического состояния, результаты свертки контролируемых параметров с использованием полиномов Колмогорова-Габора и метода наименьших квадратов (кривая 2) и результаты свертки контролируемых параметров с использованием полиномов Колмогорова-Габора и алгоритма стохастической оптимизации SPSA (кривая 3).

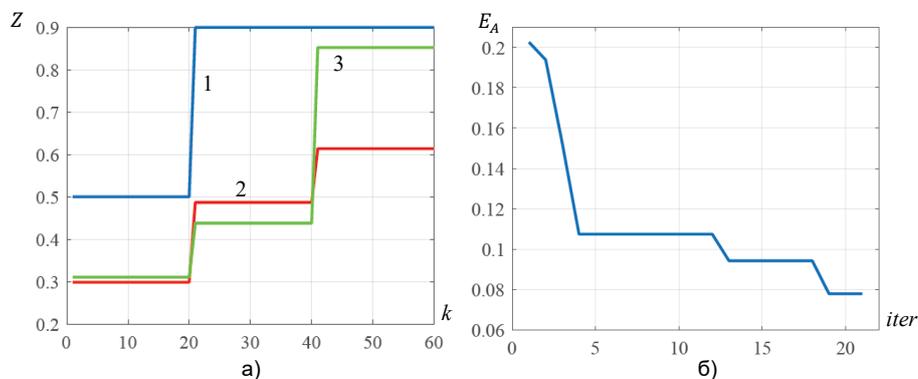


Рисунок 3 – Зависимости обобщенного параметра технического состояния подсистемы СТС от дискретного времени (а) и погрешности аппроксимации обобщенного параметра от номера итерации процесса оптимизации (б)

Алгоритм SPSA (simultaneous perturbation stochastic approximation) относится к классу рандомизированных алгоритмов с пробным возмущением, его используют при решении задач глобальной оптимизации сложной функции с большим количеством локальных экстремумов и взаимной зависимостью между оптимизируемыми параметрами [13]. В случае использования алгоритма SPSA удалось достичь более высокой точности приближения к требуемому результату, так как происходила вариация допусков контролируемых параметров и обобщенных параметров технического состояния. На рисунке 3б представлена зависимость погрешности аппроксимации E_A требуемой зависимости обобщенного параметра технического состояния от номера итерации *iter* процесса оптимизации с использованием алгоритма SPSA.

Отмеченные свойства обобщенных параметров технического состояния сложных систем, формируемых в виде полиномиальной свертки контролируемых параметров, и рассмотренный пример показывают возможность использования обобщенных параметров технического состояния СТС, формализованных на основе полиномов Колмогорова-Габова, для решения задач прогнозирования технического состояния и надежности СТС и их подсистем.

Итерационный характер подбора коэффициентов и оптимизации целевой функции не являются ограничением рассмотренного подхода, поскольку подбор коэффициентов и обучение моделей осуществляются на этапе создания системы диагностического контроля СТС. При этом реализуется модель формирования обобщенных параметров технического состояния, осуществляется настройка коэффициентов полиномиальной свертки контролируемых параметров и производится первоначальное определение допусков на значения обобщенных параметров. На этапе эксплуатации и применения СТС формирование обобщенных параметров ее технического состояния осуществляется в процессе функционирования СТС встроенной системой технического диагностирования алгоритмически с выдачей результатов в систему поддержки принятия решения.

Заключение

Контроль технического состояния и техническое диагностирование СТС в процессе эксплуатации и применения по назначению является необходимым условием элементом внедрения информационных технологий мониторинга и управления техническим состоянием СТС. При этом использование обобщенных параметров технического состояния СТС имеет принципиальное значение для принятия решений по их применению и прогнозированию надежности функционирования. Выдача в систему поддержки принятия решения текущих и прогнозных значений обобщенных параметров технического состояния СТС позволяет оперативно принимать решения по управлению СТС. Выбор обобщенных параметров технического состояния осуществляется на этапе создания СТС и их формирование должно закладываться в логику функционирования встроенных систем диагностического контроля. Это позволяет в процессе эксплуатации СТС по текущим и прогнозным данным контролировать соответствие технического состояния и функциональных возможностей СТС заданным требованиям, своевременно принимать решения по управлению применением и планировать мероприятия технической эксплуатации СТС.

Список источников

1. Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов: монография. М.: Наука, 2006. 408 с.
2. Боев С.Ф., Рахманов А.А., Линкевичиус А.П., Якубовский С.В., Володин П.В. Создание и эксплуатация радиолокационных станций дальнего обнаружения // Вопросы радиоэлектроники. 2020. №5. С. 35-48.
3. Поспелов Д.А. Ситуационное управление: теория и практика. М.: Едиториал УРСС, 2021. 288 с.

4. Лобан А.В. Информационная технология распределенного диагностирования космических аппаратов. М.: Директ-Медиа, 2015. 146 с.
5. Полянский В.И. Нечеткие множества в моделях и методах диагностирования сложных технических систем. М.: Полиграф сервис, 2010. 241 с.
6. Зеленцов В.А., Ковалев А.П., Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Методология создания и применения интеллектуальных информационных технологий наземно-космического мониторинга сложных объектов // Труды СПИИРАН. 2013. Вып.28. С. 7-81.
7. Охтилев М.Ю., Мустафин Н.Г., Миллер В.Е., Соколов Б.В. Концепция проактивного управления сложными объектами: теоретические и технологические основы // Известия вузов. Приборостроение. 2014. Т.57. №11. С. 7-15.
8. Лоскутов А.И., Клыков В.А. Идентификация и техническая диагностика бортовой аппаратуры автономных космических аппаратов на основе биективного преобразования множества диагностических признаков // Контроль. Диагностика. 2016. №4. С. 57-63.
9. Ивахненко А.Г., Юрачковский Ю.П. Моделирование сложных систем по экспериментальным данным. М.: Радио и связь, 1987. 116 с.
10. Мажуга В.В., Хачумов В.М. Контроль и диагностика технических и биологических систем на основе метода группового учета аргументов // Искусственный интеллект и принятие решений. 2009. №4. С. 80-87.
11. Кузнецов М.П., Мафусалов А.А., Животовский Н.К., Зайцев Е.Ю., Сунгуров Д.С. Сглаживающие алгоритмы прогнозирования // Машинное обучение и анализ данных. 2011. Т.1. №1. С. 104-112.
12. Ивахненко А.Г., Степашко В.С. Помехоустойчивость моделирования. К.: Наук. думка, 1985. 216 с.
13. Граничин О.Н., Поляк Б.Т. Рандомизированные алгоритмы оценивания и оптимизации при почти произвольных помехах: монография. М.: Наука, 2003. 293 с.

Информация об авторах

А.В. Тимошенко – доктор технических наук, профессор;
Г.Н. Мальцев – доктор технических наук, профессор;
А.Н. Калюта – кандидат технических наук.