

Метрология и информационно-измерительные приборы и системы

УДК 681.325.688

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2020-23-6-84-99>

## Алгоритмическое обеспечение адаптивных систем автоматического контроля со сжатием данных

В. В. Алексеев, Е. М. Антонюк, И. Е. Варшавский✉

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

✉ [varshavskiyie@gmail.com](mailto:varshavskiyie@gmail.com)

### Аннотация

**Введение.** Экспоненциальный рост объема измерительной информации, обусловленный постоянным усложнением технических и производственных объектов, приводит к необходимости совершенствования информационно-измерительных систем, к появлению систем нового поколения, в том числе адаптивных систем автоматического контроля. Для решения задач автоматического критериального отбора и сокращения избыточной измерительной информации, непрерывно поступающей от многопараметрических источников, характеризующих исследуемые объекты, создаются перестраиваемые в процессе работы алгоритмы функционирования систем автоматического контроля. В отличие от известных систем автоматического контроля с временным разделением каналов в рассматриваемых адаптивных системах возможно первоочередное получение информации о предаварийном и даже аварийном режимах работы объекта.

**Цель работы.** Создание алгоритмического обеспечения адаптивных систем автоматического контроля с использованием асинхронно-циклического и параллельно-последовательного алгоритмов функционирования и сравнение их между собой по погрешности, обусловленной многоканальностью, достоверности контроля, коэффициенту сжатия и быстродействию.

**Материалы и методы.** Алгоритмическое обеспечение адаптивных систем основано на использовании теории массового обслуживания, имитационном моделировании с использованием языков программирования MatLab/Simulink, C++.

**Результаты.** Разработанное алгоритмическое обеспечение для систем автоматического контроля с асинхронно-циклическим анализом отклонений позволяет снизить количество избыточной информации более чем в 4 раза и повысить быстродействие в 1.5 раза. Алгоритмическое обеспечение для систем автоматического контроля с параллельно-последовательным анализом отклонений позволяет в 1.4 раза снизить погрешность, вызванную многоканальностью, и приблизить достоверность контроля таких систем к достоверности контроля систем с непрерывным контролем. Анализ графиков погрешности, обусловленной многоканальностью, показывает, что системы автоматического контроля, использующие параллельно-последовательный алгоритм функционирования, инвариантны к закону распределения входных величин, в отличие от систем с асинхронно-циклическим алгоритмом функционирования.

**Заключение.** Полученные результаты имеют практическое применение, так как дают возможность проектировать адаптивные системы автоматического контроля, выдающие информацию о состоянии объекта контроля, в том числе о предаварийном и аварийном режимах работы, в реальном времени. Это позволяет использовать полученную информацию непосредственно для регулирования и поддержания работоспособности сложных объектов и управления технологическими процессами.

**Ключевые слова:** информационно-измерительная система, система автоматического контроля, адаптивный алгоритм, сжатие данных, дискретный контроль, достоверность контроля

**Для цитирования:** Алексеев В. В., Антонюк Е. М., Варшавский И. Е. Алгоритмическое обеспечение адаптивных систем автоматического контроля со сжатием данных // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2020. Т. 23, № 6. С. 84–99. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-6-84-99

---

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

Статья поступила в редакцию 10.06.2020; принята к публикации после рецензирования 15.11.2020; опубликована онлайн 29.12.2020

---



## Algorithmic Support of Adaptive Automatic Control Systems with Data Compression

Vladimir V. Alekseev, Evgeny M. Antonyuk, Ilyas E. Varshavskiy✉

Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", St Petersburg, Russia

✉ varshavskiyie@gmail.com

### Abstract

**Introduction.** The exponential growth of measurement information caused by ongoing complication of technical and production facilities necessitates the development of improved or brand new information and measurement systems, including those performing adaptive automatic control functions. Automatic criteria-based selection and reduction of measurement information continuously supplied by multi-parameter sources characterizing the objects under study require algorithms ensuring reconfiguration of automatic control systems during operation. In comparison with automatic control systems based on time-division channelling, the considered adaptive systems provide timely information on the pre-emergency and emergency operation of a facility.

**Aim.** To develop an algorithmic support for adaptive automatic control systems using asynchronous-cyclic and parallel-sequential operating algorithms, as well as to compare the proposed algorithms in terms of their, control reliability, compression ratio, operation speed and the error associated with multi-channelling.

**Materials and methods.** The algorithms proposed for supporting the operation of adaptive systems were developed on the basis of queuing theory and simulation modelling using the MatLab/Simulink programming languages, C++.

**Results.** The developed algorithmic support for automatic control systems based on asynchronous-cyclic analysis of deviations allows the amount of redundant information to be reduced by more than 4 times and the operation speed to be increased by 1.5 times. The developed algorithmic support for automatic control systems based on parallel-sequential analysis of deviations allows the error associated with multi-channelling to be reduced by 1.4 times, thereby bringing the control reliability of such systems closer to that of continuous-control systems. An analysis of the graphs of the error associated with multi-channelling showed that the automatic control systems based on parallel-sequential operational algorithms are invariant to the law of distribution of input quantities, compared to the systems based on asynchronous-cyclic operational algorithms.

**Conclusions.** The proposed algorithmic support can significantly decrease the redundancy of information and improve the metrological characteristics of automatic control systems. The use of the developed algorithms in automatic control systems based on time-division channelling render their control reliability comparable with that of continuous-control systems.

**Keywords:** information and measuring system, automatic control system, adaptive algorithm, data compression, discrete control, control reliability

**For citation:** Alekseev V. V., Antonyuk E. M., Varshavskiy I. E. Algorithmic Support of Adaptive Automatic Control Systems with Data Compression. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2020, vol. 23, no. 6, pp. 84–99. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-6-84-99

**Conflict of interest.** Authors declare no conflict of interest.

Submitted 10.06.2020; accepted 15.11.2020; published online 29.12.2020

**Введение.** Современный высокотехнологичный объект формирует большие потоки измерительной информации, которая после сбора, анализа и обработки используется для решения задач прогнозирования, управления, регулирования и контроля характеристик исследуемого объекта. Реальный многопа-

раметрический объект часто функционирует в условиях недостаточности априорных сведений о его характеристиках, что при использовании многоканальной информационно-измерительной системы (ИИС) с временным разделением каналов может приводить к пропуску аварийного или предаварий-

ного режима работы объекта из-за роста погрешности, вызванной многоканальностью [1]. В то же время использование ИИС с непрерывным опросом источников измерительных сообщений может быть невозможно или затруднено ввиду наличия требований к каналу связи, по которому отправляются данные от измерительной системы, например, к устройствам управления и регулирования [2] или ввиду наличия требований к человекомашинному интерфейсу [3], который должен учитывать естественные физиологические ограничения оператора.

Задачи анализа и обработки больших объемов информации принято решать увеличением вычислительных мощностей [4, 5], что часто затруднено или невозможно ввиду удаленности исследуемого объекта от источников непрерывного питания, наличия требований по габаритам и своевременности получения информации. Решить задачи анализа и обработки больших объемов измерительных данных можно предварительно сократив количество избыточной информации [6, 7].

Для решения задачи опроса множества источников измерительной информации, поступающей от сложного многопараметрического объекта в условиях недостаточности априорных сведений и наличия необходимости в сокращении избыточной информации, были разработаны адаптивные информационно-измерительные системы (АИИС) со сжатием данных, которые нашли применение в составе телеизмерительных систем [8].

АИИС можно разделить на системы с буферной памятью [9] и системы без буферной памяти [10]. Системы с буферной памятью позволяют получать высокие коэффициенты сжатия благодаря статистическим подходам к сжатию информации, однако имеют сниженное быстродействие, что накладывает ограничения на использование таких систем при решении задач управления и регулирования.

Системы без буферной памяти предназначены для работы в реальном времени, что позволяет использовать такие системы в условиях жесткой необходимости своевременного получения информации, например для решения задач управления и регулирования [11]. Под сжатием данных в таких системах следует понимать уменьшение объемов избыточной информации, что реализуется различными способами опроса источников измерительных сообщений при временном разделении каналов.

Адаптивные информационно-измерительные системы делятся на системы с переменным и постоянным периодом следования выходной информации. К системам с переменным периодом следования относятся асинхронно-циклические, с регулируемой частотой коммутации и мультиплицированные ИИС. К системам с постоянным периодом следования выходной информации относятся системы с равномерной дискретизацией и адаптивной коммутацией.

Для решения задачи сокращения объемов измерительной информации при необходимости применения системы для управления, регулирования и контроля можно использовать критериальный отбор информации [12], когда входные величины сравниваются с одним или несколькими параметрами и на основе сравнения система автоматически формирует требования к опросу соответствующих каналов. ИИС, автоматически осуществляющие критериальный отбор информации, называются системами автоматического контроля (САК).

На основе принципов действия АИИС с применением критериального отбора информации было разработано алгоритмическое обеспечение, позволяющее реализовывать адаптивные системы автоматического контроля (АСАК) со сжатием данных на основе программируемых модулей (микроконтроллеров, программируемых логических контроллеров (ПЛК)) и модели АСАК, которые можно применять для автоматизации расчетов характеристик систем и решения задач прогнозирования работоспособности объекта.

Разработанное алгоритмическое обеспечение было исследовано на инвариантность к закону распределения входных величин, были определены и рассчитаны достоверность контроля, быстродействие и коэффициент сжатия моделей АСАК в зависимости от законов распределения входных величин и критериев отбора информации системой.

**Алгоритмическое обеспечение адаптивных систем автоматического контроля.** Разработка алгоритмического обеспечения производилась методами алгоритмизации с формализацией последовательности выполнения математических и логических операций в виде псевдокода. Алгоритмическое обеспечение разрабатывалось в соответствии с принципом модульности, когда отдельная операция или несколько операций могут служить основой для формирования отдельного аппаратного блока – модуля [2].

Одним из алгоритмов для использования в составе АСАК является алгоритм функционирования системы автоматического контроля с асинхронно-циклическим анализом отклонений [13], описанный в табл. 1.

Алгоритм функционирования  $n$ -го канала адаптивной системы автоматического контроля с асинхронно-циклическим анализом отклонений представлен на рис. 1.

Получение информации  $S^n$  (табл. 1) от источников измерительных сообщений осуществляется на основе операции сбора информации  $F_c^n$  (рис. 1), где верхний индекс обозначает номер канала.

Для задач контроля и управления важно своевременное получение информации о выходе значения контролируемой величины за допустимое отклонение. Такой подход к анализу контролируемых

величин требует формирования разностных сигналов  $F_p^n$ , которые формируются на основе вычисления отклонения измеряемых величин от номинального значения  $A$ .

Для дальнейшего анализа разностных сигналов необходимо формирование их беззнакового представления, что производится на основе операции вычисления модуля  $F_M^n$ .

Взятые по модулю разностные сигналы сравниваются с заранее заданным допустимым отклонением  $\epsilon_d$  в каждом канале  $\epsilon_d^n$ . Результатом операции сравнения  $F_{cp}^n$  являются булевские величины "1" и "0", характеризующие наличие и отсутствие отклонения соответственно.

Табл. 1. Описание алгоритма функционирования адаптивной системы автоматического контроля с асинхронно-циклическим анализом отклонений

Table 1. Description of the functioning algorithm of the adaptive automatic control system with asynchronous-cyclic analysis of deviations

Алгоритм функционирования	Комментарии
<p>BEGIN</p> <p><math>M_1: F_M^1 =  F_P^1 (F_c^1(S^1, A^1));</math></p> <p>IF <math>F_M^1 &lt; \epsilon_d^1</math>, THEN <math>F_{cp}^1 = \text{false}</math></p> <p>ELSE <math>F_{cp}^1 = \text{true}</math>, <math>F_{p,i}^1 (F_T^1) = \text{true};</math></p> <p><math>F_{i,i}^1 = \text{AND}(F_{cp}^1, F_{p,i}^1);</math></p> <p>IF <math>F_{i,i}^1 = \text{true}</math>, THEN <math>F_k^1 = F_p^1</math></p> <p>ELSE <math>F_k^1 = 0;</math></p>	<p>Начало выполнения алгоритма</p> <p>Расчет модуля разностного сигнала</p> <p>Проверка на превышение</p> <p>Включение первого канала</p> <p>Отправка к выходу канала значения параметра</p>
<p><math>M_2: F_M^2 =  F_P^2 (F_c^2(S^2, A^2));</math></p> <p>IF <math>F_M^2 &lt; \epsilon_d^2</math>, THEN <math>F_{cp}^2 = \text{false}</math></p> <p>ELSE <math>F_{cp}^2 = \text{true}</math>, <math>F_{p,i}^2 (F_T^2) = \text{true};</math></p> <p><math>F_{i,i}^2 = \text{AND}(F_{cp}^2, F_{p,i}^2);</math></p> <p>IF <math>F_{i,i}^2 = \text{true}</math>, THEN <math>F_k^2 = F_p^2</math></p> <p>ELSE <math>F_k^2 = 0;</math></p> <p>...</p>	<p>Расчет модуля разностного сигнала</p> <p>Проверка на превышение</p> <p>Включение второго канала</p> <p>Отправка к выходу канала значения параметра</p>
<p><math>M_n: F_M^n =  F_P^n (F_c^n(S^n, A^n));</math></p> <p>IF <math>F_M^n &lt; \epsilon_d^n</math>, THEN <math>F_{cp}^n = \text{false}</math></p> <p>ELSE <math>F_{cp}^n = \text{true}</math>, <math>F_{p,i}^n (F_T^n) = \text{true};</math></p> <p><math>F_{i,i}^n = \text{AND}(F_{cp}^n, F_{p,i}^n);</math></p> <p>IF <math>F_{i,i}^n = \text{true}</math>, THEN <math>F_k^n = F_p^n</math></p> <p>ELSE <math>F_k^n = 0;</math></p>	<p>Расчет модуля разностного сигнала</p> <p>Проверка на превышение</p> <p>Включение <math>n</math>-го канала</p> <p>Отправка к выходу канала значения параметра</p>
<p><math>M_N: F_M^N =  F_P^N (F_c^N(S^N, A^N));</math></p> <p>IF <math>F_M^N &lt; \epsilon_d^N</math>, THEN <math>F_{cp}^N = \text{false}</math></p> <p>ELSE <math>F_{cp}^N = \text{true}</math>, <math>F_{p,i}^N (F_T^N) = \text{true};</math></p> <p><math>F_{i,i}^N = \text{AND}(F_{cp}^N, F_{p,i}^N);</math></p> <p>IF <math>F_{i,i}^N = \text{true}</math>, THEN <math>F_k^N = F_p^N</math></p> <p>ELSE <math>F_k^N = 0;</math></p>	<p>Расчет модуля разностного сигнала</p> <p>Проверка на превышение</p> <p>Включение <math>N</math>-го канала</p> <p>Отправка к выходу канала значения параметра</p>
<p><math>F_{OO} = F_k^1 + F_k^2 + \dots + F_k^N</math>, GOTO <math>M_1</math>;</p> <p>END</p>	<p>Формирование выходного значения</p> <p>Завершение выполнения алгоритма</p>

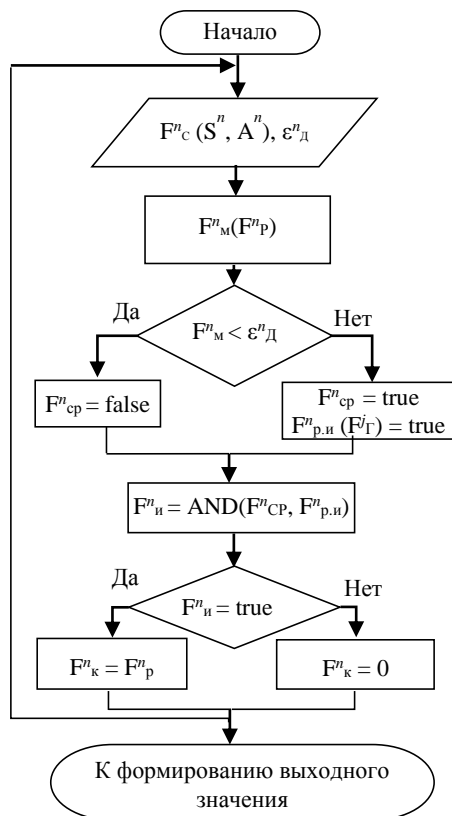


Рис. 1. Блок-схема алгоритма функционирования  $n$ -го канала адаптивной системы автоматического контроля с асинхронно-циклическим анализом отклонений

Fig. 1. Block-diagram of the functioning algorithm of the  $n$ -th channel of the adaptive automatic control system with asynchronous-cyclic analysis of deviations

Опрос каналов осуществляется с помощью операций распределения импульсов  $F_{p,и}^n$ , которые формируют требование к опросу на основе операции последовательной генерации номеров каналов  $F_i^j$ , где верхний индекс обозначает номер итерации генератора.

Если от генератора поступает значение, соответствующее номеру канала  $n$ , то булевская переменная, сформированная на основе операции  $F_{p,и}^N$ , примет значение "1", при этом во всех остальных каналах аналогичная переменная примет значение "0".

Для опроса  $n$ -го канала необходимо, чтобы на основе операций  $F_{cp}^n$  и  $F_{p,и}^n$  одновременно сформировались единицы, если контролируемая величина в соответствующем канале превысила или скоро превысит допустимое отклонение, при этом очередь на опрос определяется операцией по распределению импульсов.

Окончательное требование к опросу канала формируется на основе логической операции "И"  $F_и^n$ . Если переменная, сформированная на основе операции  $F_и^n$ , в соответствующем канале приняла значение "1", то  $n$ -й канал будет опрошен, если "0", то одно из требований к опросу  $n$ -го канала не было сформировано.

Для удобства представления способа формирования выходного сигнала системы с асинхронно-циклическим анализом отклонений на

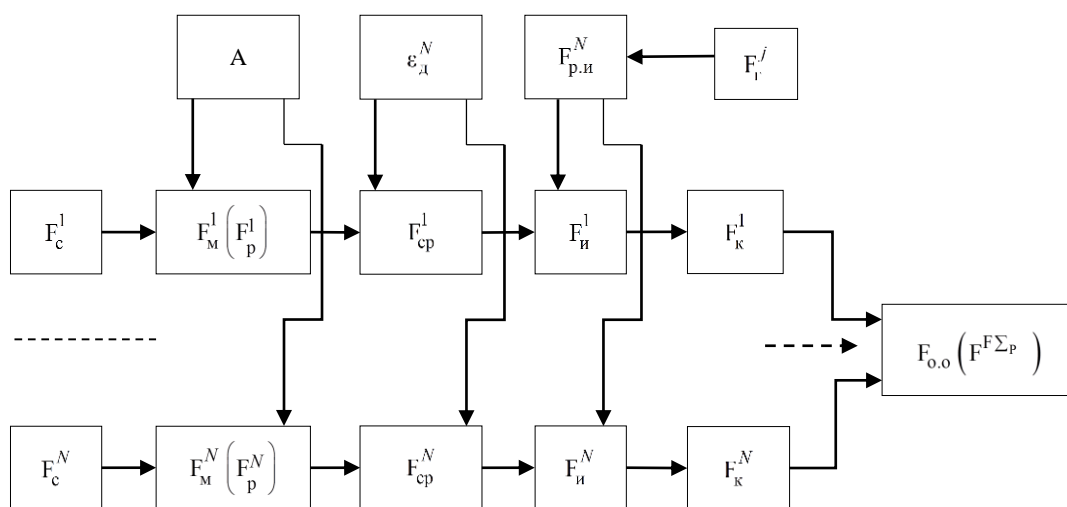


Рис. 2. Структурная схема алгоритма функционирования адаптивной системы автоматического контроля с асинхронно-циклическим анализом отклонений

Fig. 2. Structural scheme of the functioning algorithm of the adaptive automatic control system with asynchronous-cyclic analysis of deviations

рис. 2 представлена структурная схема, каждый блок которой обозначает операцию или группу операций.

Обнаружение отклонений  $F_{o.o}$  (рис. 2) осуществляется с помощью операций коммутации  $F_K^n$  – отправки к выходу системы разностного сигнала от канала, где операция  $F_{И}^n$  сформировала требование к опросу. Операция коммутации  $F_K^n$  при наличии требования к опросу от  $F_{И}^n$  присваивает переменной в соответствующем канале значение разностного сигнала  $F_p^n$ .

Так как принцип распределения импульсов  $F_{р.и}^n$  позволяет формировать требование к опросу одного канала в конкретный момент времени, операцию обнаружения отклонения целесообразно формировать на основе суммы результатов операций  $F_K^n$ .

Алгоритм функционирования АСАК с асинхронно-циклическим обслуживанием позволяет осуществлять однокритериальный опрос контролируемых величин, что существенно влияет на простоту реализации такого алгоритма [14]. Однако при появлении требований к опросу на основе операций сравнения  $F_{ср}^n$  во всех каналах одновременно система переходит к равномерной временной дискретизации, что может приводить к аварийному или предаварийному режиму работы контролируемого объекта из-за выхода отклонений за допустимое значение при ожидании опроса в очереди [1, 8].

Устранение такого недостатка возможно при использовании алгоритмов с адаптивной коммутацией, например алгоритма функционирования адаптивной системы автоматического контроля с параллельно-последовательным анализом отклонений (табл. 2) [2].

Алгоритм функционирования  $n$ -го канала адаптивной системы автоматического контроля с параллельно-последовательным анализом отклонений представлен на рис. 3.

После проведения сбора  $F_c^n$  (рис. 3) информации  $S^1$  (табл. 2), поступающей от датчиков, рассчитывается отклонение  $F_p^n$  измеренного сигнала от заранее заданного номинального значения  $A$ .

Для удобства дальнейшего анализа рассчитывается модуль разностного сигнала  $F_M^n$ . На основе сравнения беззнаковых значений разностных сигналов формируются параллельные номера каналов, в которых отклонение достигло максимального значения  $F_{н.м.с}^n$ .

Номер канала, который будет опрошен в первую очередь, определяется на основе логического выражения, позволяющего при появлении максимальных отклонений в нескольких каналах одновременно отправить к выходу САК значение контролируемой величины от канала с наименьшим порядковым номером, т. е. приоритет устанавливается по номеру канала, что позволяет контролировать в первую очередь каналы с наиболее

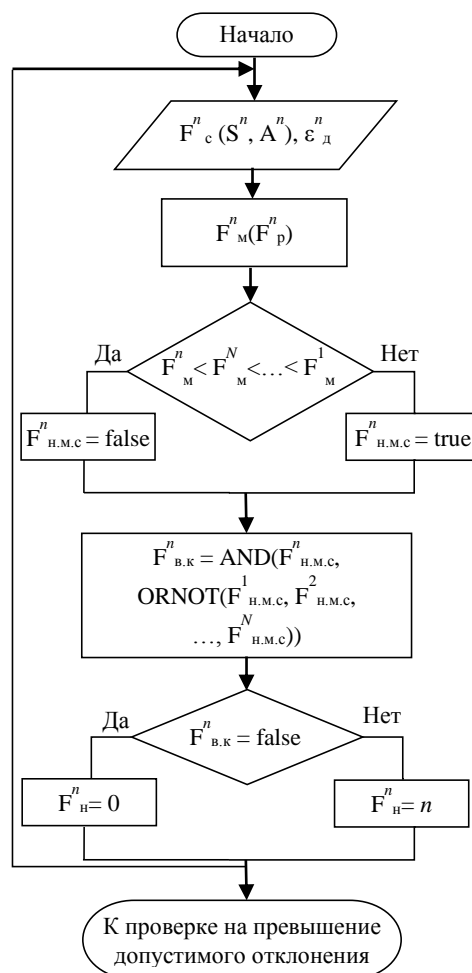


Рис. 3. Блок-схема алгоритма функционирования  $n$ -го канала адаптивной системы автоматического контроля с параллельно-последовательным анализом отклонений

Fig. 3. Block diagram of the functioning algorithm of the  $n$ -th channel of the adaptive automatic control system with parallel-sequential analysis of deviations

Табл. 2. Описание алгоритма функционирования адаптивной системы автоматического контроля с параллельно-последовательным анализом отклонений

Table 2. Description of the functioning algorithm of the adaptive automatic control system with parallel-sequential analysis of deviations

Алгоритм функционирования	Комментарии
BEGIN M1: $F^1_M =  F^1_P (F^1_C(S^1, A^1));$ IF $F^1_M < F^2_M < \dots < F^N_M$ , THEN $F^1_{HMC} = \text{false}$ ELSE $F^1_{HMC} = \text{true}$ , $(F^1_H, F^1_{BK}) = 1;$  M2: $F^2_M =  F^2_P (F^2_C(S^2, A^2));$ IF $F^2_M < F^N_M < \dots < F^1_M$ , THEN $F^2_{HMC} = \text{false}$ ELSE $F^2_{HMC} = \text{true};$ $F^2_{BK} = \text{AND}(F^2_{HMC}, \text{NOT}(F^1_{HMC}));$ IF $F^2_{BK} = \text{false}$ , THEN $F^2_H = 0$ ELSE $F^2_H = 2;$  ... Mn: $F^n_M =  F^n_P (F^n_C(S^n, A^n));$ THEN $F^n_{HMC} = \text{false}$ ELSE $F^n_{HMC} = \text{true};$ $F^n_{BK} = \text{AND}(F^n_{HMC}, \text{ORNOT}(F^1_{HMC}, F^2_{HMC}, \dots,$ $F^N_{HMC}));$ IF $F^n_{BK} = \text{false}$ , THEN $F^n_H = 0$ ELSE $F^n_H = n;$  MN: $F^N_M =  F^N_P (F^N_C(S^N, A^N));$ IF $F^N_M < F^{N-1}_M < \dots < F^1_M$ , THEN $F^N_{HMC} = \text{false}$ ELSE $F^N_{HMC} = \text{true};$ $F^N_{BK} = \text{AND}(F^N_{HMC}, \text{ORNOT}(F^1_{HMC}, F^2_{HMC}, \dots,$ $F^{N-1}_{HMC}));$ IF $F^N_{BK} = \text{false}$ , THEN $F^N_H = 0$ ELSE $F^N_H = N;$  $F^{\Sigma} = F^1_H + F^N_H + \dots + F^N_H;$ IF $F^{\Sigma} < \varepsilon^N_d$ , THEN $F_{OO} = 0$ , GOTO M1 ELSE $F_{OO} = F^{\Sigma}_P$ , GOTO M1; END	Начало выполнения алгоритма Расчет модуля разностного сигнала Расчет номера канала с макс. отклонением с использованием алгоритма по выбору канала  Расчет модуля разностного сигнала Расчет номера канала с макс. отклонением с использованием алгоритма по выбору канала  Расчет модуля разностного сигнала Расчет номера канала с макс. отклонением с использованием алгоритма по выбору канала  Расчет модуля разностного сигнала Расчет номера канала с макс. отклонением с использованием алгоритма по выбору канала  Проверка на превышение и формирование выходного значения САК – обнаружение отклонения Завершение выполнения алгоритма

важными для функционирования объекта параметрами.

Выражение, описывающее способ выбора каналов для алгоритма функционирования САК последовательно-параллельного анализа в операторной форме, имеет вид

$$F^N_{B.K} = F^N_{H.M.C} \wedge F^1_{H.M.C} \vee F^2_{H.M.C} \vee \dots \vee F^N_{H.M.C}, \quad (1)$$

где  $\wedge$  – знак конъюнкции;  $\vee$  – знак дизъюнкции, а черта над операциями выявления номера канала с максимальным сигналом – знак логического отрицания.

На основе сравнения и использования (1) формируется параллельный код номера выбранного канала  $F^N_{B.K}$ . Для удобства отправки к выходу САК значения контролируемого параметра от выбранного канала параллельный код адреса канала преобразуется в последовательный в каждом канале  $F^N_H$ .

Поскольку (1) позволяет принимать значение "1" переменной, полученной на основе операции  $F^N_{B.K}$ , только в одном, наиболее важном канале, в определенный момент времени, то для выбора параметра от соответствующего канала удобно использовать сумму  $F^1_H + F^2_H + \dots + F^N_H$ , которая и будет последовательным номером выбранного канала  $F^{\Sigma}$ .

Для удобства представления способа формирования выходного сигнала системы с параллельно-последовательным анализом отклонений на рис. 4 представлена структурная схема, каждый блок которой обозначает операцию или группу операций.

Для формирования требования к опросу выбранный параметр  $F^{\Sigma}_M$  (рис. 4) сравнивается с заранее установленным допустимым отклонением  $\varepsilon_d$ . Контролируемая величина от выбранного

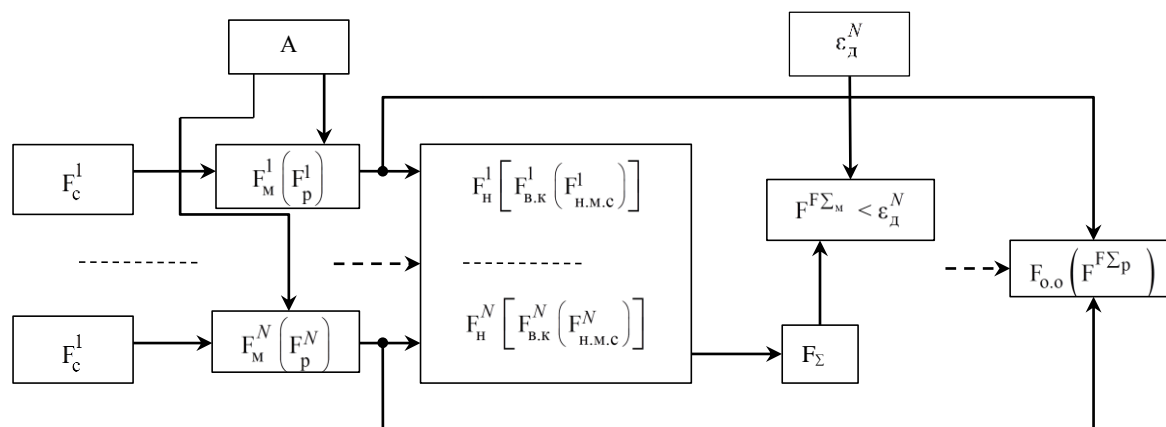


Рис. 4. Структурная схема алгоритма функционирования адаптивной системы автоматического контроля с параллельно-последовательным анализом отклонений

Fig. 4. Structural scheme of the functioning algorithm of the adaptive automatic control system with parallel-serial analysis of deviations

канала  $F^{F\Sigma_p}$  поступает к выходу САК, если разностный сигнал, взятый по модулю от канала, номер которого получен в результате анализа, вышел или может выйти за пределы допустимого отклонения в ближайшее время, в противном случае поиск номера канала с максимальным отклонением в приоритетном канале повторяется, начинается новая итерация работы САК.

В разработанном алгоритме проводится параллельный анализ максимальных отклонений во всех каналах САК, при этом требования к опросу вырабатываются на основе одного сравнения с допустимым отклонением, что позволяет наиболее оперативно отправить к контролю, управлению или регулированию наиболее важный в данный момент параметр объекта контроля.

**Характеристики адаптивных систем автоматического контроля со сжатием данных.** Оценка погрешности, вызванной многоканальностью. Важной метрологической характеристикой АСАК является дополнительная погрешность, вызванная многоканальностью, которая обусловлена ожиданием обслуживания того или иного канала. Оценки этой погрешности удобно определять с применением теории массового обслуживания, что позволяет оценивать погрешность без применения моделирования.

При оценке погрешности, вызванной многоканальностью, система (см. рис. 2, 4) представляется как система массового обслуживания. Входным потоком заявок является поток моментов выполнения операций сравнения  $F_{cp}^N$ , а длительность обслуживания определяется как время между моментом появления заявки и моментом

окончания ее обслуживания, т. е. моментом выполнения операции по обнаружению отклонения  $F_{O.O}$ . Время поиска канала, нуждающегося в обслуживании, в данном случае является случайной величиной, зависящей от числа каналов. Время обслуживания заявки с учетом возможности регулирования выбранного параметра также может быть случайным.

Для адаптивных систем автоматического контроля с асинхронно-циклическим анализом отклонений первый и второй начальные моменты приведенной погрешности, обусловленной многоканальностью, рассчитываются по формулам [1]:

$$\frac{M(\epsilon_m)}{\epsilon_d} = \frac{\rho^2}{N(1-\rho)}; \quad (2)$$

$$\frac{\sigma(\epsilon_m)}{\epsilon_d} = \frac{\rho}{N(1-\rho)} \sqrt{2\rho(\sigma_{пр}^2 + 1) - \rho^2},$$

где  $\epsilon_m$  – погрешность, вызванная многоканальностью;  $M(\epsilon_m)$  – математическое ожидание погрешности, вызванной многоканальностью;  $\rho$  – параметр системы массового обслуживания;  $N$  – число каналов системы;  $\sigma(\epsilon_m)$  – среднеквадратичное отклонение погрешности, вызванной многоканальностью;  $\sigma_{пр}^2 = \frac{D(M_1)}{M^2(M_1)}$  – приведенное значение дисперсии модуля-максимума первой производной сигнала;  $M^2(M_1)$ ,  $D(M_1)$  – квадрат математического ожидания и дисперсия модуля максимума первой производной сигнала.



Одним из видов недостаточности априорных сведений об объекте контроля является отсутствие информации о законе распределения входных величин. Оценивая погрешность от многоканальности, можно, в том числе, оценить инвариантность системы к законам распределения входных сигналов по крутизне изменения оценки СКО погрешности от параметра, зависящего от закона распределения входных величин  $\sigma_{\text{пр}}^2$ .

График зависимости оценки СКО погрешности (2), вызванной многоканальностью, при  $N = 4$  показан рис. 5.

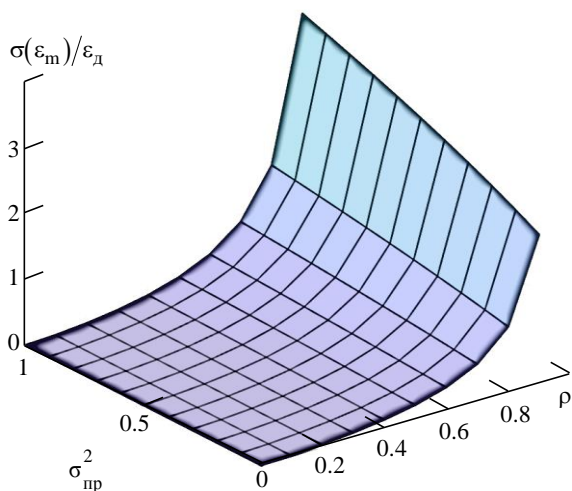


Рис. 5. График зависимости оценки СКО погрешности, вызванной многоканальностью, для адаптивной системы автоматического контроля с асинхронно-циклическим анализом отклонений

Fig. 5. The graph of the dependence of the estimation of the RMS of the error arising from multichannel for an adaptive automatic control system with asynchronous-cyclic analysis of deviations

Характеристика погрешности, вызванной многоканальностью, график которой показан на рис. 5, имеет выраженную зависимость от закона распределения входных величин. Стоит отметить, что  $\sigma_{\text{пр}}^2 = 0.33$  соответствует равномерному, 0.56 – нормальному, а близкая к 1 – экспоненциальному закону распределения модуля максимума первой производной входного сигнала.

Для систем автоматического контроля с адаптивной коммутацией, в том числе и для адаптивной системы автоматического контроля с параллельно-последовательным анализом отклонений, оценки приведенной погрешности от многоканальности рассчитываются по формулам [1]:

$$\frac{M(\epsilon_m)}{\epsilon_d} = \frac{\rho^2}{2N(1-\rho)}; \quad (3)$$

$$\frac{\sigma(\epsilon_m)}{\epsilon_d} = \frac{\rho^2}{2N(1-\rho)} \sqrt{\frac{4D(M_1)}{M^2(M_1)} + 3}.$$

График зависимости оценки СКО приведенной погрешности (3) от многоканальности для адаптивной системы автоматического контроля с параллельно-последовательным анализом отклонений при  $N = 4$  представлен на рис. 6.

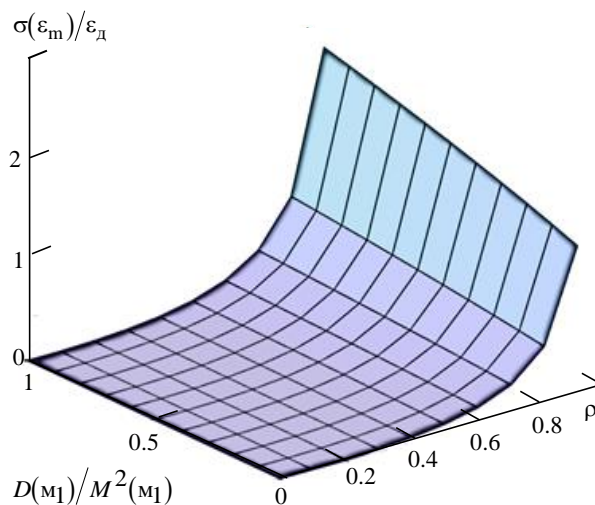


Рис. 6. График зависимости оценки СКО погрешности, вызванной многоканальностью, для адаптивной системы автоматического контроля с параллельно-последовательным анализом отклонений

Fig. 6. The graph of the dependence of the estimated RMS of the error arising from multichannel for an adaptive automatic control system with parallel-sequential analysis of deviations

Оценка СКО приведенной погрешности от многоканальности для АСАК с параллельно-последовательным анализом (рис. 6) отклонений ниже аналогичной характеристики АСАК с асинхронно-циклическим анализом отклонений (рис. 5), что свидетельствует о меньшем влиянии случайной составляющей погрешности на систему с параллельно-последовательным анализом отклонений. Зависимость системы с параллельно-последовательным анализом отклонений от закона распределения входных величин близка к линейной и существенно ниже, чем у системы с асинхронно-циклическим анализом отклонений.

Достоверность контроля многоканальной АСАК – это вероятность того, что система обнаружит отклонения контролируемых параметров от но-

минальных значений, требования к обнаружению которых сформировались согласно используемому алгоритму функционирования.

Достоверность контроля систем оценивалась на основе моделирования в среде графического программирования Simulink в режиме реального времени (External mode) [15], при типе решателя ode 5 с периодом следования входных импульсов в 0.0001 с. Входные воздействия с равномерным, нормальным и экспоненциальным законами распределения величин были нормированы и распределены в интервале от 0 до 1.

Для системы автоматического контроля с асинхронно-циклическим анализом отклонений, алгоритм функционирования которой представлен в табл. 1, достоверность контроля  $D_{АСЦ}$  определяется как отношение вероятности успешного формирования результата операции  $F_{и}^N$  в канале, где сформировалось требование к опросу, на основе операции сравнения  $F_{ср}^N$  анализируемого параметра с допустимым отклонением  $\epsilon_d$  к расчетным значениям этих вероятностей. Расчетные значения вероятностей успешного формирования операций логического "И" и сравнения определяются при расчете, когда алгоритм распределения импульсов формирует "1" у каждого своего выхода на каждой итерации работы системы, что соответствует непрерывному режиму опроса системы.

Для непосредственного расчета, при условии, что результатами операций  $F_{и}^N$  и  $F_{ср}^N$  являются бинарные значения, вероятность успешного формирования результата операций  $P_{N,i}(F_{и}^N)$ ,  $P_{N,i}(F_{ср}^N)$  будет равна результату самой операции во время работы системы для каждого канала АСАК при каждой итерации работы системы. Тогда формула для расчета оценки достоверности контроля будет иметь вид

$$D_{АСЦ} = \frac{\sum_{N,i} [P_{N,i}(F_{и}^N) \odot P_{N,i}(F_{ср}^N)]}{\sum_{N,i} [P_{N,i}^P(F_{и}^N) \odot P_{N,i}^P(F_{ср}^N)]} \approx \frac{\sum_{N,i} (F_{и}^{N,i} \odot F_{ср}^{N,i})}{\sum_{N,i} (F_{и}^{N,i} \odot F_{ср}^{N,i})_P}, \quad (4)$$

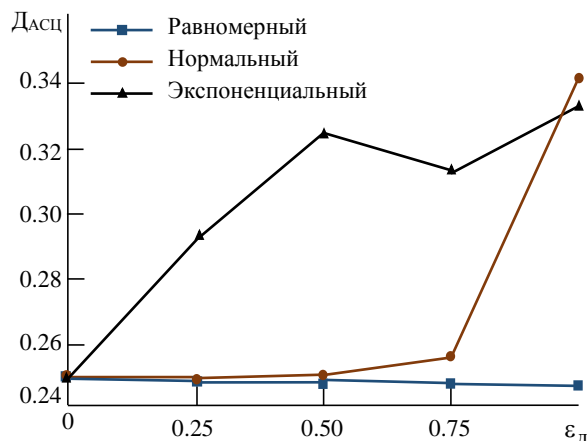


Рис. 7. График зависимости достоверности контроля адаптивной системы автоматического контроля с асинхронно-циклическим анализом отклонений от допустимого отклонения и закона распределения входных величин

Fig. 7. The graph of the dependence of the reliability of control of the adaptive automatic control system with asynchronous-cyclic analysis of deviations from the permissible deviation and the law of distribution of input quantities

где  $P_{N,i}^P(F_{и}^N)$ ,  $P_{N,i}^P(F_{ср}^N)$  – расчетные вероятности успешного формирования результатов соответствующих операций в  $N$  каналах системы на каждой  $i$ -й итерации работы АСАК;  $\odot$  – произведение Адамара.

График зависимости достоверности контроля АСАК с асинхронно-циклическим анализом отклонений, вычисленной по (4), от допустимого отклонения и закона распределения входных величин показан на рис. 7.

Стоит отметить, что достоверность контроля (рис. 7) при экспоненциальном распределении входных величин существенно превосходит достоверность контроля при других законах распределения, что объясняется в первую очередь численной близостью первого и второго начальных моментов входных величин.

Достоверность контроля  $D_{П.П}$  АСАК с параллельно-последовательным анализом отклонений (см. рис. 3) может быть оценена двумя способами. Первый способ предлагает оценку достоверности контроля, когда приоритетность входных сигналов заранее неизвестна, т. е., например, к первому каналу системы может поступать сигнал с наименее важным параметром, а к последнему – с наиболее важным и значение, выбираемое в соответствии с (1), не будет удовлетворять концепции по выбору значения с заранее установленным приоритетом. Тогда достоверность контроля оценивается так:

$$D_{п.п} \approx \frac{\left\{ \sum_i \left[ F_{В.К}^{1,i} \odot \left( F_M^{F_{\Sigma},i} \geq \varepsilon_d \right) \right] + \dots \right.}{\sum_{N,i} \left( F_M^{N,i} \geq \varepsilon_d \right)_p}, \quad (5)$$

где  $F_{В.К}^{N,i}$  – операция по выбору канала на основе (1) для  $N$ -го канала при  $i$  итерациях работы системы;  $F_M^{F_{\Sigma},i} \geq \varepsilon_d$  – операция по сравнению выбранного максимального по модулю параметра с допустимым отклонением при  $i$  итерациях работы системы;  $\sum_{N,i} \left( F_M^{N,i} \geq \varepsilon_d \right)_p$  – сумма по  $N$  и по  $i$  операциям сравнения с допустимым отклонением, определяемая на основе расчета.

Стоит отметить, что в отличие от (4), в числителе (5) производится построчное суммирование произведений Адамара – операций, на основе которых формируются требования к отправке выбранного параметра к выходу системы. Суммирование произведений Адамара производится построчно, так как операция по сравнению выбранного параметра с допустимым отклонением осуществляется последовательно, т. е. во время работы системы формируется массив-строка по  $i$  ре-

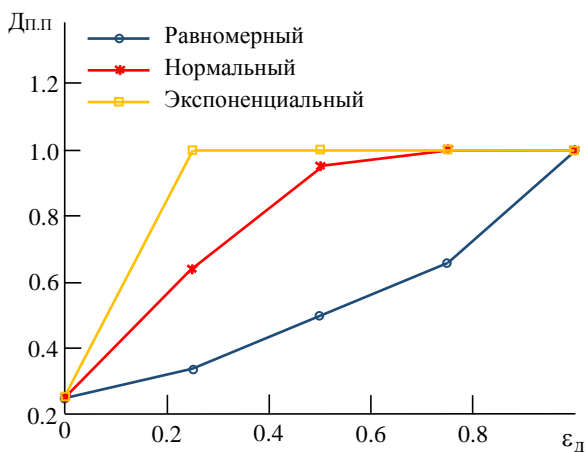


Рис. 8. График зависимости достоверности контроля адаптивной системы автоматического контроля с параллельно-последовательным анализом отклонений от допустимого отклонения и закона распределения входных величин

Fig. 8. The graph of the dependence of the reliability of control of the adaptive automatic control system with parallel-sequential analysis of deviations from the permissible deviation and the distribution law of input quantities

зультатам операций сравнения, а операции по выбору канала, в котором отклонение достигло максимального по модулю значения, формируют матрицу с размерами  $N$  на  $i$ .

График зависимости оценки достоверности контроля (5) адаптивной системы автоматического контроля с параллельно-последовательным анализом отклонений от допустимого отклонения и закона распределения входных величин показан на рис. 8.

Стоит отметить, что оценка достоверности контроля АСАК с параллельно-последовательным анализом отклонений при заранее неизвестном приоритете входных сигналов (рис. 8) существенно превосходит аналогичную оценку для АСАК с асинхронно-циклическим анализом отклонений (см. рис. 7).

Второй способ оценки достоверности контроля используется, если приоритет входных сигналов заранее установлен, т. е. к первому каналу подключен источник сигналов с наиболее важными в контексте решаемой задачи параметрами. Тогда формула для оценки достоверности контроля адаптивной системы автоматического контроля с параллельно-последовательным анализом отклонений будет иметь вид (6)

$$D_{п.п} \approx \frac{\left\{ \sum_i \left[ F_{В.К}^{1,i} \odot \left( F_M^{F_{\Sigma},i} \geq \varepsilon_d \right) \right] + \dots \right.}{\sum_{N,i} \left[ F_{В.К}^{N,i} \odot \left( F_M^{N,i} \geq \varepsilon_d \right) \right]_p}, \quad (6)$$

где  $\sum_{N,i} \left[ F_{В.К}^{N,i} \odot \left( F_M^{N,i} \geq \varepsilon_d \right) \right]_p$  – расчетная сумма произведений Адамара операций по выбору канала и операций сравнения выбранного максимального по модулю параметра с допустимым отклонением.

Выражение (6) отличается от (5) учетом в знаменателе заранее устанавливаемого приоритета (1) с помощью операций по выбору канала.

В таком случае оценка достоверности контроля, вычисляемая по (6), будет близка к единице инвариантно к закону распределения входных величин и значению допустимого отклонения.

*Коэффициент сжатия.* Важной оценкой способности АСАК сокращать объемы избыточной информации является коэффициент сжатия  $k_{сж}$  [16].

В общем случае коэффициент сжатия рассчитывается как отношение суммарного количества отсчетов сигналов, поступающих к входам системы  $n_{вх}$ , к суммарному количеству отсчетов сигнала, вырабатываемого на выходе системы  $n_{вых}$ .

Для алгоритмов, показанных в табл. 1 и 2, оценку коэффициента сжатия удобно рассчитывать как отношение суммы длин массивов, полученных за время проведения эксперимента в результате операции по сбору информации  $\bar{F}_c^N$ , к длине массива, полученного в результате операции по обнаружению отклонения  $\bar{F}_{0,0}$  (7):

$$k_{сж} = \frac{n_{вх}}{n_{вых}} = \frac{\sum \bar{F}_c^N}{\bar{F}_{0,0}}. \quad (7)$$

Значения коэффициента сжатия для АСАК с асинхронно-циклическим анализом отклонений приведены в табл. 3.

Табл. 3. Коэффициент сжатия для модели адаптивной системы автоматического контроля с асинхронно-циклическим анализом отклонений в зависимости от допустимого отклонения

Table 3. Compression ratio of the model of the adaptive automatic control system with asynchronous-cyclic analysis of deviations depending on the permissible deviation

Закон распределения входных величин	Допустимое отклонение $\epsilon_d$				
	0	0.25	0.5	0.75	0.95
Равномерный	4	5.3	8	9.9	10
Нормальный	16	16	53	121	27884
Экспоненциальный	16	4585	32737	393100	-

Как видно из табл. 3, наибольший коэффициент сжатия для модели АСАК с асинхронно-циклическим анализом отклонений достигается при экспоненциальном законе распределения входных величин.

Зависимость коэффициента сжатия (7) от закона распределения и допустимого отклонения для АСАК с параллельно-последовательным анализом отклонений показана в табл. 4.

Стоит отметить, что способность АСАК с асинхронно-циклическим анализом отклонений (табл. 3) уменьшать количество избыточной информации превосходит аналогичный параметр (табл. 4) АСАК с параллельно-последовательным анализом отклонений. Это объясняется отсутствием алгоритма по выбору канала (1) в первой

системе, который подразумевает отправку к выходу системы в первую очередь отклонений, достигших максимального значения.

Табл. 4. Коэффициент сжатия для модели адаптивной системы автоматического контроля с параллельно-последовательным анализом отклонений и выбором приоритетного канала в зависимости от допустимого отклонения

Table 4. Compression ratio for the model of the adaptive automatic control system with parallel-sequential analysis of deviations and the choice of a priority channel depending on the permissible deviation

Закон распределения входных величин	Допустимое отклонение $\epsilon_d$				
	0	0.25	0.5	0.75	0.95
Равномерный	4	4	4	6	26
Нормальный	4	5	28	568	9523
Экспоненциальный	4	649	5555	25000	66667

**Быстродействие.** Быстродействие адаптивных систем автоматического контроля со сжатием данных характеризуется временем выполнения алгоритмов систем (см. табл. 1 и 2). Время выполнения алгоритмов моделей АСАК со сжатием данных рассчитывается как разность между значением времени обнаружения отклонения на выходе системы и значением времени появления отсчетов изменяемых сигналов у входов САК:

$$T = t_{0,0} - t_c, \quad (8)$$

где  $t_{0,0}$  – время завершения операции по обнаружению отклонения;  $t_c$  – время завершения операции сбора информации.

Поскольку время выполнения операций АСАК (8) является случайной величиной, быстродействие модели САК удобно оценивать через его вероятностную характеристику  $T'$ :

$$T' = \frac{\sum T_i}{i}, \quad (9)$$

где  $i$  – количество итераций работы модели САК, проведенных за время эксперимента.

Время выполнения операций (9) моделей адаптивных САК, выполненных в среде программирования Simulink на вычислительном устройстве с процессором intel Core i7-7700K, который во время эксперимента работал на частоте 4.2 ГГц, при  $i > 1 \cdot 10^6$  и периоде следования отсчетов входных сигналов 0.0001 с составляет  $T' \approx 1 \cdot 10^{-4}$  с.

Оценка быстродействия разработанных алгоритмов проводилась в том числе с использованием микроконтроллера ARM Cortex-M3 AT91SAM3X8E, который во время эксперимента работал на частоте 84 МГц.

Суммарное время выполнения операций АСАК (9) оценивалось в двух режимах – в псевдомногозадачном и многозадачном. В псевдомногозадачном режиме алгоритм САК выполнялся на одном вычислительном устройстве, операции выполнялись последовательно. В многозадачном режиме операции для каждого канала соответствующей АСАК выполнялись на отдельном модульном вычислительном устройстве, при этом каналы САК синхронизировались с помощью модуля часов реального времени.

Оценка быстродействия САК в многозадачном режиме представлена с учетом времени считывания\записи в цифровые порты микроконтроллеров.

Суммарное время выполнения  $T'_{АСЦ}$  операций (9) АСАК с асинхронно-циклическим анализом отклонений представлено в табл. 5.

Табл. 5. Суммарное время выполнения операций адаптивной системы автоматического контроля с асинхронно-циклическим анализом отклонений

Table 5. Total time of execution of operations of the adaptive automatic control system with asynchronous-cyclic analysis of deviations

Режимы работы	Время выполнения $T'_{АСЦ}$ , мкс	Математическое ожидание абсолютной погрешности $\bar{\Delta}$
Псевдомногозадачный	73.8	$2 \cdot 10^{-16}$
Многозадачный	32.2	$3 \cdot 10^{-16}$

Многозадачный режим позволяет существенно повысить быстродействие САК с асинхронно-циклическим анализом отклонений. В многозадачном режиме время выполнения алгоритма, показанного в табл. 1, включает в себя время, затрачиваемое на синхронизацию параллельно работающих устройств, и время на считывание\отправку значений параметров к цифровым портам устройств микроконтроллера, однако это время существенно меньше времени, затрачиваемого на вычисления в псевдомногозадачном режиме.

Погрешность при реализации САК на основе разработанных алгоритмов возникает при операциях разности, взятия модуля и суммирования значений для отправки к выходу системы.

Уменьшение погрешности возможно при замене операции суммирования разностных значений анализируемых параметров  $F_k^1 + F_k^2 + \dots + F_k^N$  на операции сравнения в каждом канале и операцию присваивания перед отправкой анализируемого параметра к выходу САК. В таком случае погрешность составит  $2 \cdot 10^{-16}$ , время выполнения алгоритма в псевдомногозадачном режиме 87.8 мкс, а в многозадачном режиме 37.2 мкс.

Суммарное время выполнения  $T'_{ПП}$  операций (9) АСАК с параллельно-последовательным анализом отклонений и выбором приоритетного канала представлено в табл. 6.

Табл. 6. Суммарное время выполнения операций адаптивной системы автоматического контроля с параллельно-последовательным анализом отклонений

Table 6. Total time of execution of operations of the adaptive automatic control system with parallel-sequential analysis of deviations

Режимы работы	Время выполнения $T'_{ПП}$ , мкс	Математическое ожидание абсолютной погрешности $\bar{\Delta}$
Псевдомногозадачный	109.8	$2 \cdot 10^{-16}$
Многозадачный	53.2	$3 \cdot 10^{-16}$

Быстродействие АСАК с параллельно-последовательным анализом отклонений (табл. 6) обусловлено, в первую очередь, наличием алгоритма выбора канала с максимальным по модулю отклонением с помощью логических операций. В многозадачном режиме такая особенность выбора каналов повышает время выполнения алгоритма относительно времени выполнения алгоритма, показанного в табл. 2, в том числе из-за большего числа операций по чтению\записи в цифровые порты устройств.

**Заключение.** В статье рассмотрено алгоритмическое обеспечение адаптивных систем автоматического контроля, позволяющих получать информацию о состоянии технологических процессов и сложных объектов в реальном времени, что дает возможность использовать полученную информацию непосредственно для регулирования технологических процессов, прогнозирования и

поддержания работоспособности объекта. Представлены различные алгоритмы опроса каналов в системах с временным разделением каналов. Проведено сравнение быстродействия и достоверности контроля при асинхронно-циклическом опросе и адаптивной коммутации каналов с различными вариантами анализа отклонений контролируемых сигналов от номинальных значений.

Получены выражения, позволяющие оценивать погрешности от многоканальности при использовании различных алгоритмов. Показана ин-

вариантность алгоритмов функционирования систем автоматического контроля с адаптивной коммутацией к законам распределения входных сигналов.

Разработанные алгоритмы позволяют создавать адаптивные системы автоматического контроля на основе программируемых модулей и модели АСАК, предназначенные для расчета характеристик систем, демонстрации принципа действия и решения задачи прогнозирования функционирования сложных объектов.

### Список литературы

1. Telemetry system with adaptive commutation / E. M. Antonyuk, I. E. Varshavskiy, I. S. Kolpakova, A. A. Minina, P. E. Antonyuk // IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conf. (ElConRusNW). 2016. P. 389–391. doi: 10.1109/ElConRusNW.2016.7448202
2. Algorithmic Support for an Adaptive Automatic Monitoring System / E. M. Antonyuk, I. E. Varshavskiy, N. V. Orlova, P. E. Antonyuk // IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus). St. Petersburg and Moscow, Russia. 2020. P. 91–95. doi: 10.1109/ElConRus49466.2020.9039192
3. Анохин А. М., Ивкин А. С. Человеко-машинный интерфейс для поддержки когнитивной деятельности оператором АС // Ядерные измерительно-информационные технологии. 2012. № 1 (41). С. 57–66.
4. Левенец А. В. Принципы разработки перспективных способов сжатия телеметрических данных // Вестн. Тихоокеанского гос. ун-та. 2017. № 2 (45). С. 31–38.
5. Куприянова О. В., Левенец А. В. Адаптивные способы передачи данных в информационно-измерительных системах // Информационные технологии XXI в. Хабаровск, 2016. С. 87–95.
6. Un C. E., Fedyayev A. U., Levenets A. V. Segmentation of measurement data for improvement of compression efficiency // 2015 Intern. Siberian Conf. on Control and Communications (SIBCON), Omsk, 2015. P. 1–4. doi: 10.1109/SIBCON.2015.7147123
7. Levenets A. V., Chye E. U., Bogachev I. V. Reversible structural transformation methods of measuring data frames as a means of increasing the efficiency of compression // 2018 Intern. Multi-Conf. on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), Vladivostok, 2018. P. 1–6. doi: 10.1109/FarEastCon.2018.8602827
8. Antonyuk E. M., Varshavskiy I. E., Antonyuk P. E., Orlova N. V. Adaptive Transmitting Device of a Telemetry System // 2019 IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus). 2019. P. 66–68. doi: 10.1109/ElConRus.2019.8656757
9. Левенец А. В., Нефедьев Д. И. Принципы организации подсистемы сжатия многоканальных измерительных данных // Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации ("Шляндинские чтения - 2019"): материалы XI Междунар. науч.-техн. конф. с элементами научной школы и конкурсом научно-исследовательских работ для студентов, аспирантов и молодых ученых / под ред. Е. А. Печерской, Пенза, 28–30 окт. 2019 г. Пенза: Изд-во ПГУ, 2019. С. 16–19.
10. Володькин М. Д., Левенец А. В. Методы сжатия данных в информационно-измерительных системах // Информационные технологии XXI в. / отв. ред. В. В. Воронин. Хабаровск, 2019. С. 126–130.
11. Иванов А. И., Левенец А. В. Системы управления процессом низковольтного электроискрового легирования // Материалы секционных заседаний 57-й студенческой науч.-практ. конф. ТОГУ: в 2 т. / Тихоокеанский гос. ун-т. 2017. С. 179–181.
12. Богачев И. В., Левенец А. В., Нефедьев Д. И. Классификация данных на основе нейросетевых технологий в подсистемах сжатия информационно-измерительных систем // Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации ("Шляндинские чтения-2020"): материалы XII Междунар. науч.-техн. конф. с элементами научной школы и конкурсом научно-исследовательских работ для студентов, аспирантов и молодых ученых / под ред. Е. А. Печерской, Пенза, 16–18 марта 2020 г. Пенза: Изд-во ПГУ, 2020. С. 282–285.
13. Антонюк Е. М., Варшавский И. Е., Кривоухов О. А. Асинхронно-циклические системы автоматического контроля // Изв. СПбГЭТУ "ЛЭТИ". 2017. № 9. С. 66–70.
14. Сарычев В. В. Алгоритм адаптивного обслуживания многоканального потока заявок // Изв. ТРТУ. 2000. № 1 (15). С. 75.
15. Wang Y., Qu X. A novel real-time simulation platform for testing control algorithm // The 27<sup>th</sup> Chinese Control and Decision Conf. (2015 CCDC), Qingdao, 2015. P. 4748–4750. doi: 10.1109/CCDC.2015.7162764
16. Сарычев В. В. Телеметрическая система на базе интеллектуальных интерфейсов // Изв. ЮФУ. Техн. науки. 2010. № 2 (103). С. 68–73.

## Информация об авторах

**Алексеев Владимир Васильевич** – д.т.н. (1993) по специальности "Информационно-измерительные и управляющие системы" (Промышленность). Профессор (1995) кафедры информационно-измерительной техники, информационно-измерительных и управляющих систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ", заведующий кафедрой ИИСТ. Сфера научных интересов – метрология, информационно-измерительные системы.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5, 197376, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: vvalekseev@etu.ru

<https://orcid.org/0000-0002-5287-7053>

**Антонюк Евгений Михайлович** – д. т. н. (2003), профессор (2009). Почетный работник высшего профессионального образования РФ (2006). Окончил СПбГЭТУ "ЛЭТИ" в 1960 г. С 1964 г. работает на кафедре информационно-измерительных систем и технологий СПбГЭТУ "ЛЭТИ". Соавтор семи учебников для вузов (один на английском языке). Печатных работ 297, из них 115 авторских свидетельств и патентов. Сфера научных интересов – метрология, информационно-измерительные системы.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5, 197376, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: peterant@hotmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-0016-3905>

**Варшавский Ильяс Евгеньевич** – преподаватель-исследователь (2019), ассистент кафедры ИИСТ. Выпускник кафедры фотоники, приборостроения, оптических и биотехнических систем и технологий СПбГЭТУ "ЛЭТИ" (2019). Опубликованных работ – 24. Сфера научных интересов – метрология, информационно-измерительные системы.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5, 197376, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: varshavskiyie@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-4924-2097>

---

## References

1. Antonyuk E. M., Varshavskiy I. E., Kolpakova I. S., Minina A. A., Antonyuk P. E. Telemetry system with adaptive commutation. 2016 IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conf. (ElConRusNW), St. Petersburg, 2016, pp. 389–391. doi: 10.1109/ElConRusNW.2016.7448202
2. Antonyuk E. M., Varshavskiy I. E., Kolpakova I. S., Minina A. A., Antonyuk P. E. Support for an Adaptive Automatic Monitoring System. 2020 IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), St. Petersburg and Moscow, Russia, 2020, pp. 91–95. doi: 10.1109/ElConRus49466.2020.9039192
3. Anokhin A. M., Ivkin A. S. Human-machine interface for supporting cognitive activity by the operator of the NPP. *Yadernyye izmeritel'no-informatsionnyye tekhnologii* [Nuclear measuring and information technologies], 2012, no. 1 (41), pp. 57–66. (In Russ.)
4. Levenets A. V. Principles of development of promising methods of compression of telemetric data. *Vestnik Tikhookeanskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the Pacific State University], 2017, no. 2 (45), pp. 31–38. (In Russ.)
5. Kupriyanova O. V., Levenets A. V. Adaptive methods of data transmission in information-measuring systems. *Vsbornike: Informatsionnyye tekhnologii XXI veka. Sbornik nauchnykh trudov*. [In the collection: Information technologies of the XXI century. Collection of scientific papers], Khabarovsk, 2016, pp. 87–95. (In Russ.)
6. Un C. E., Fedyaev A. U., Levenets A. V. Segmentation of measurement data for improvement of compression efficiency 2015 International Siberian Conf. on Control and Communications (SIBCON), Omsk, 2015, pp. 1–4. doi: 10.1109/SIBCON.2015.7147123
7. Levenets A. V., Chye E. U., Bogachev I. V. Reversible structural transformation methods of measuring data frames as a means of increasing the efficiency of compression. 2018 International Multi-Conf. on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), Vladivostok, 2018, pp. 1–6. doi: 10.1109/FarEastCon.2018.8602827
8. Antonyuk E. M., Varshavskiy I. E., Orlova N. V. and Antonyuk P. E. Adaptive Transmitting Device of a Telemetry System. 2019 IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), St Petersburg and Moscow, Russia, 2019, pp. 66–68. doi: 10.1109/ElConRus.2019.8656757
9. Levenets A. V., Nefediev D. I. *Printsipy organizatsii podsystemy szhatiya mnogokanal'nykh izmeritel'nykh dannykh* [Principles of organization of the multichannel measurement data compression subsystem]. In the collection: Methods, means and technologies for obtaining and processing measurement information. Materials of the XI Intern. Scientific and Technical Conf. with elements of a sci-

entific school and a research competition for students, graduate students and young scientists. Ed. E. A. Pecherskaya, 2019, pp. 16–19. (In Russ.)

10. Volodkin M. D., Levenets A. V. Methods of data compression in information-measuring systems. *Vsbornike: Informatsionnyye tekhnologii XXI veka. Sbornik nauchnykh trudov* [In the collection: Information technologies of the XXI century. Collection of scientific papers], Khabarovsk, 2019, pp. 126–130. (In Russ.)

11. Ivanov A. I., Levenets A. V. Control systems for the process of low-voltage electrospark alloying. *Vsbornike: Materialy sektiornykh zasedaniy 57-y studencheskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii TOGU* [In the collection: Materials of section sessions of the 57th student scientific-practical conference PNU. Pacific State University], 2017, pp. 179–181. (In Russ.)

12. Bogachev I. V., Levenets A. V., Nefediev D. I. Classification of data based on neural network technologies in compression subsystems of information-measuring systems. *Vsbornike: Metody, sredstva i tekhnologii polucheniya i obrabotki izmeritel'noy informatsii* [In the collection: Methods, means and technologies for obtaining and processing

measuring information. Materials of the XII Intern. Scientific and Technical Conf. with elements of a scientific school and a competition of research papers for students, graduate students and young scientists. Ed. E. A. Pecherskaya], Penza, 2020, pp. 282–285. (In Russ.)

13. Antonyuk E. M., Varshavsky I. E., Krivokhvost O. A. Asynchronous-cyclic systems of automatic control. *Izvestiya SPbGETU "LETI"* [Journal of the Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"], 2017, no. 9, pp. 66–70. (In Russ.)

14. Sarychev V. V. Algorithm for adaptive servicing of a multichannel flow of applications. *Izvestiya TRTU* [Journal of the Taganrog Technological Institute], 2000, no. 1 (15), pp. 75. (In Russ.)

15. Wang Y. and Qu X. A novel real-time simulation platform for testing control algorithm. The 27th Chinese Control and Decision Conf. (2015 CCDC), Qingdao, 2015, pp. 4748–4750. doi: 10.1109/CCDC.2015.7162764.

16. Sarychev V. V. Telemetry system based on intelligent interfaces. *Izvestia YUFU. Tekhnicheskiye nauki* [Journal of the SFU. Technical science], 2010, no. 2 (103), pp. 68–73. (In Russ.)

#### Information about the authors

**Vladimir V. Alekseev**, Dr. Sci. (Eng.) (1993), Professor (1995) at the Department of Information Measurement Technology, Information Measurement and Control Systems St Petersburg State Electrotechnical University ("LETI"), head of the Department of IIST. Area of expertise: metrology, information-measuring systems. Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 Professor Popov St., St Petersburg 197376, Russia  
E-mail: vvalekseev@etu.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-5287-7053>

**Evgeny M. Antonyuk**, Dr. Sci. (Eng.) (2003), Professor (2009). Honorary Worker of Higher Professional Education of the Russian Federation (2006). He graduated from SPbETU "LETI" (1960). Since 1964 he worked at the Department of Information-measuring systems and technologies of St. Petersburg State Electrotechnical University "LETI". Coauthor of 7 textbooks for universities (one in English). There are 297 printed works, including 115 copyright certificates and patents. Area of expertise: metrology, information-measuring systems. Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 Professor Popov St., St Petersburg 197376, Russia  
E-mail: peterant@hotmail.com  
<https://orcid.org/0000-0002-0016-3905>

**Pyas E. Varshavskiy**, Education: Researcher. Teacher Researcher. 06/12/01. Photonics, instrumentation, optical and biotechnological systems and technologies. Document number: 107824 4036521, registration number: 009. Issued: June 30, 2019. St. Petersburg State Electrotechnical University (LETI), assistant of the Department of IIST. Area of expertise: metrology, information-measuring systems. Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 Professor Popov St., St Petersburg 197376, Russia  
E-mail: varshavskiyie@gmail.com  
<https://orcid.org/0000-0003-4924-2097>