

# Система контроля и диагностирования с ускоренным анализом отклонений

Е. М. Антонюк

*Санкт-Петербургский  
государственный  
электротехнический  
университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова  
(Ленина)*

peterant@hotmail.com

П. Е. Антонюк

*Высшая школа технологий и  
энергетики Санкт-  
Петербургского  
государственного университета  
промышленных технологий и  
дизайна*

peterant7@gmail.com

Д.С. Гвоздев

*Санкт-Петербургский  
государственный  
электротехнический  
университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова  
(Ленина)*

gvozdev\_8@mail.ru

**Аннотация.** Рассматривается адаптивная система автоматического контроля и диагностики, обеспечивающая ускоренный анализ отклонений параметров многоканального объекта. Предложенный подход позволяет минимизировать погрешность, обусловленную ожиданием в очереди (погрешность многоканальности), характерную для подобных систем. Разработка направлена на повышение точности и эффективности диагностики в условиях многоканального управления.

**Ключевые слова:** информационно-измерительная система; система автоматического контроля; система технической диагностики; диагностируемый объект; погрешность многоканальности

## I. ВВЕДЕНИЕ

Современные технологические процессы и производственные системы требуют высокоэффективных методов контроля и диагностики для обеспечения их надежности, безопасности и экономической эффективности. Информационно-измерительные системы (ИИС) играют ключевую роль в решении этих задач, предоставляя данные для анализа состояния оборудования, прогнозирования отказов и оптимизации процессов [1]. Особое значение в этом контексте приобретают системы диагностики, которые позволяют своевременно выявлять отклонения в работе технических объектов, минимизируя риски аварийных ситуаций и снижая затраты на обслуживание.

Традиционные методы диагностики, основанные на статических моделях и заранее заданных параметрах, зачастую оказываются недостаточно эффективными в условиях динамически изменяющихся внешних факторов и сложных нелинейных процессов. Они не способны оперативно адаптироваться к новым условиям, что приводит к увеличению времени анализа и снижению точности диагностики. В таких условиях возрастает необходимость внедрения адаптивных систем, которые способны автоматически настраиваться на изменения в работе контролируемых объектов, обеспечивая ускоренный анализ отклонений и повышение достоверности результатов.

Адаптивные системы контроля и диагностирования, основанные на динамической корректировке процедуры анализа диагностируемых параметров, позволяют

эффективно решать задачи мониторинга в реальном времени. Они находят применение в различных областях, таких как энергетика, транспорт, нефтегазовая промышленность, авиация и медицина, где требуется высокая точность и оперативность принятия решений. Преимущество таких систем заключается в их способности учитывать не только текущее состояние объекта, но и прогнозировать его поведение в будущем, что особенно важно для предотвращения критических ситуаций [2].

Можно сделать заключение, что разработка и внедрение адаптивных систем контроля и диагностирования с ускоренным анализом отклонений представляют собой актуальную научно-техническую задачу, решение которой способно существенно повысить эффективность управления сложными техническими системами и обеспечить их устойчивую работу в условиях неопределенности и изменяющихся внешних воздействий.

## II. АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

В основе любой системы лежит алгоритм, который определяет её функционирование и эффективность. Алгоритм – набор конечного числа правил, задающих последовательность выполнения операции для решения задачи определённого типа [3]. При этом в реальных информационных системах отдельные алгоритмы редко функционируют изолированно – они объединяются в комплексные структуры, образуя алгоритмическое обеспечение. Это объединение основано на принципе композиции: каждый алгоритм, сохраняя свою базовую суть (конечный набор правил и последовательность операций), становится модулем в общей архитектуре, а также обеспечивает гибкость и масштабируемость системы в зависимости от решаемых задач.

Различные системы решают различные задачи. В контексте систем контроля и диагностирования данная задача звучит как обеспечение надёжности, безопасности и эффективности эксплуатации технических объектов путём непрерывного контроля состояния, автоматического выявления отклонений, прогнозирования потенциальных отказов и формирования управляющих воздействий, при необходимости. В соответствии с этим, можно

сформировать задачу при разработке алгоритмического обеспечения для таких систем – обработки совокупности параметров объекта диагностирования, которые измеряются с использованием первичных преобразователей (датчиков). Алгоритм должен обеспечивать идентификацию источника измерительного сигнала, выделение диагностируемого параметра и его последующую оценку на соответствие установленным нормативным требованиям [2].

Разработка алгоритмического обеспечения требует учета специфики структуры и функциональных возможностей систем, для которых оно разрабатывается. Это включает в себя не только создание алгоритмов обработки данных, но и обеспечение их интеграции с аппаратными компонентами системы. В результате, алгоритмическое обеспечение становится важнейшим элементом, определяющим эффективность и точность работы информационно-измерительных систем в задачах технической диагностики и контроля.

#### А. Алгоритм функционирования контроля и диагностирования с ускоренным анализом отклонений

Прежде чем перейти к разработке структурной схемы предлагаемого системы контроля и диагностирования, необходимо ввести алгоритм, направленный на повышение быстродействия анализа и обработки измерительной информации в централизованных информационно-измерительных системах. С этой целью ниже представлен прототип алгоритма функционирования, в основу которого положен принцип адаптивности на основе приоритетного опроса наиболее важных источников информации [4].

Алгоритм работы системы, представленный на рис. 1 начинается с инициализации, в ходе которой сбрасывается таймер ( $T$ ) и ожидается сигнал активации ( $S$ ). После этого алгоритм переходит в основной цикл, который выполняется непрерывно. В начале каждого цикла считываются данные с датчиков ( $D$ ), после чего они унифицируются ( $U$ ) и вычисляются разности ( $\Delta$ ) между унифицированными сигналами и номинальными значениями ( $N$ ).

Затем запускается генератор напряжения ( $G$ ), сбрасывается счетчик каналов ( $C$ ), и разрешается запись в регистр ( $R$ ). Для каждого канала ( $K$ ) происходит сравнение напряжения генератора ( $V_G$ ) с напряжением канала ( $V_K$ ). Если напряжения равны, в регистр ( $R$ ) для этого канала записывается "1", а в дополнительный разряд ( $R_{extra}$ ) записывается "0". После завершения цикла по каналам триггер ( $T$ ) переключается, запрещается запись в регистр ( $R$ ), генератор ( $G$ ) сбрасывается, и открывается передача импульсов ( $P$ ).

При этом продолжается передача импульсов на счетчик ( $C$ ) и регистр ( $R$ ), сдвигая информацию в регистре ( $R$ ), пока в дополнительном разряде ( $R_{extra}$ ) не появится "1". После этого фиксируется код выбранного канала ( $K_{selected}$ ). Если абсолютное значение разности  $|\Delta|$  превышает допустимое отклонение ( $\Delta_{allowed}$ ), на схемах сравнения ( $S_{comp}$ ) устанавливается сигнал "1".

В случае получения сигнала "1" запускается аналого-цифровой преобразователь ( $ADC$ ), который преобразует напряжение ( $V_K$ ) в цифровой код ( $D_{digital}$ ).

Если цифровые данные ( $D_{digital}$ ) выходят за пределы допустимого диапазона  $[D_{min}, D_{max}]$ , они передаются на индикаторы и регуляторы, записываются в регистры данных ( $R_{data}$ ) и отображаются на индикаторах.

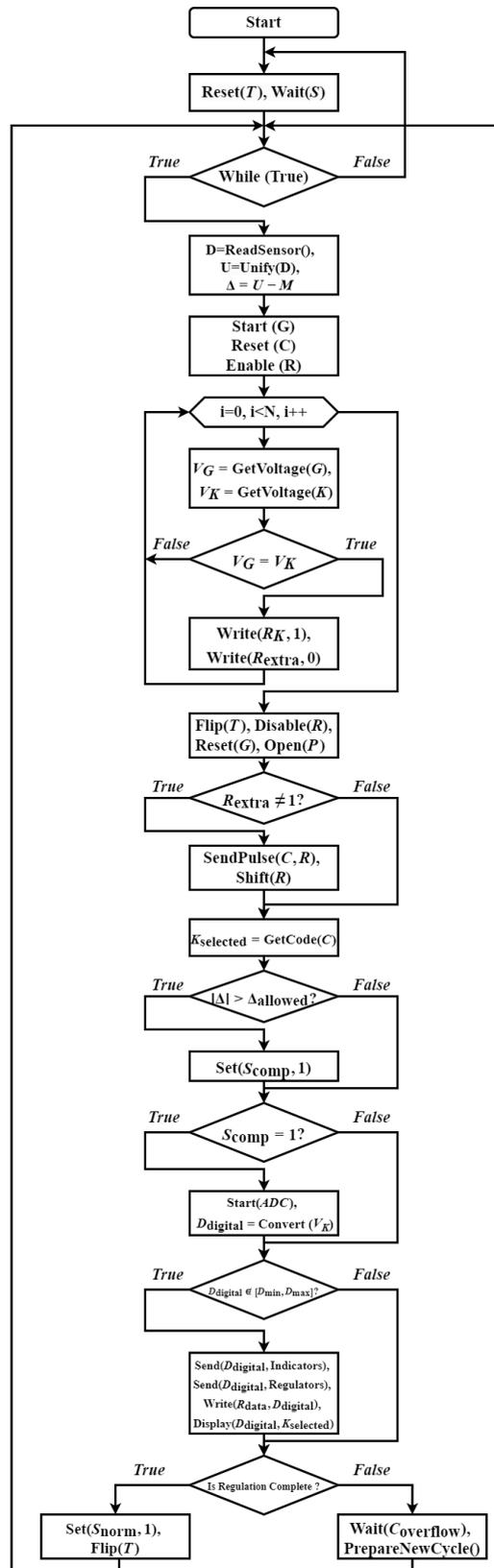


Рис. 1. Алгоритм работы системы контроля и диагностирования с ускоренным анализом отклонений

Если регулирование завершено, устанавливается сигнал "Норма" ( $S_{norm}$ ), и триггер ( $T$ ) переключается для начала нового цикла. Если регулирование невозможно, происходит переполнение счетчика ( $C$ ) и подготавливается новый цикл.

Этот алгоритм обеспечивает непрерывный мониторинг и регулирование параметров, начиная с получения данных и заканчивая индикацией и корректировкой значений.

### III. СТРУКТУРНАЯ СХЕМА СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИРОВАНИЯ С УСКОРЕННЫМ АНАЛИЗОМ ОТКЛОНЕНИЙ

На основе представленного на рис.1 алгоритма возможно построение структурной схемы системы контроля и диагностирования с ускоренным анализом отклонений. Данная схема представлена на рис. 2.

Напряжение, поступающее с выхода группы датчиков 1, подается на вход группы блоков унификации 2, где происходит преобразование сигналов в унифицированную форму. С выходов блоков унификации 2 сигналы поступают на вход группы вычитающих блоков 3, в которых осуществляется вычисление разности между напряжениями, поступающими от блоков унификации 2, и напряжениями, задаваемыми блоком 4 номинальных

значений параметра. Полученные разностные сигналы направляются на первый коммутатор 5, одновременно с этим унифицированные сигналы с выходов блоков 2 поступают на второй коммутатор 7. При активации системы через определенный временной интервал, определяемый емкостью счетчика 24, через элемент ИЛИ 12 на триггер 17 поступает сигнал, который переводит его второй выход в состояние "1". Это состояние запускает генератор 19 линейно изменяющегося (падающего) напряжения, сбрасывает счетчик 23 и разрешает запись состояний выходов группы схем сравнения 20 в регистр сдвига 21. Сигнал "1" на втором выходе триггера 17 может также появиться сразу после включения питания. Напряжение с выхода генератора 19 сравнивается с выходными напряжениями группы блоков 6 с помощью группы схем сравнения 20. В момент совпадения выходного напряжения генератора 19 с напряжением на выходе любого из блоков 6 группы, соответствующая схема сравнения 20 активируется. При этом разность между текущим значением параметра и его номинальным значением в данном канале оказывается максимальной. При срабатывании схемы сравнения 20 логическая "1" с ее выхода записывается в соответствующий разряд регистра 21, а в дополнительный разряд регистра записывается логический "0".

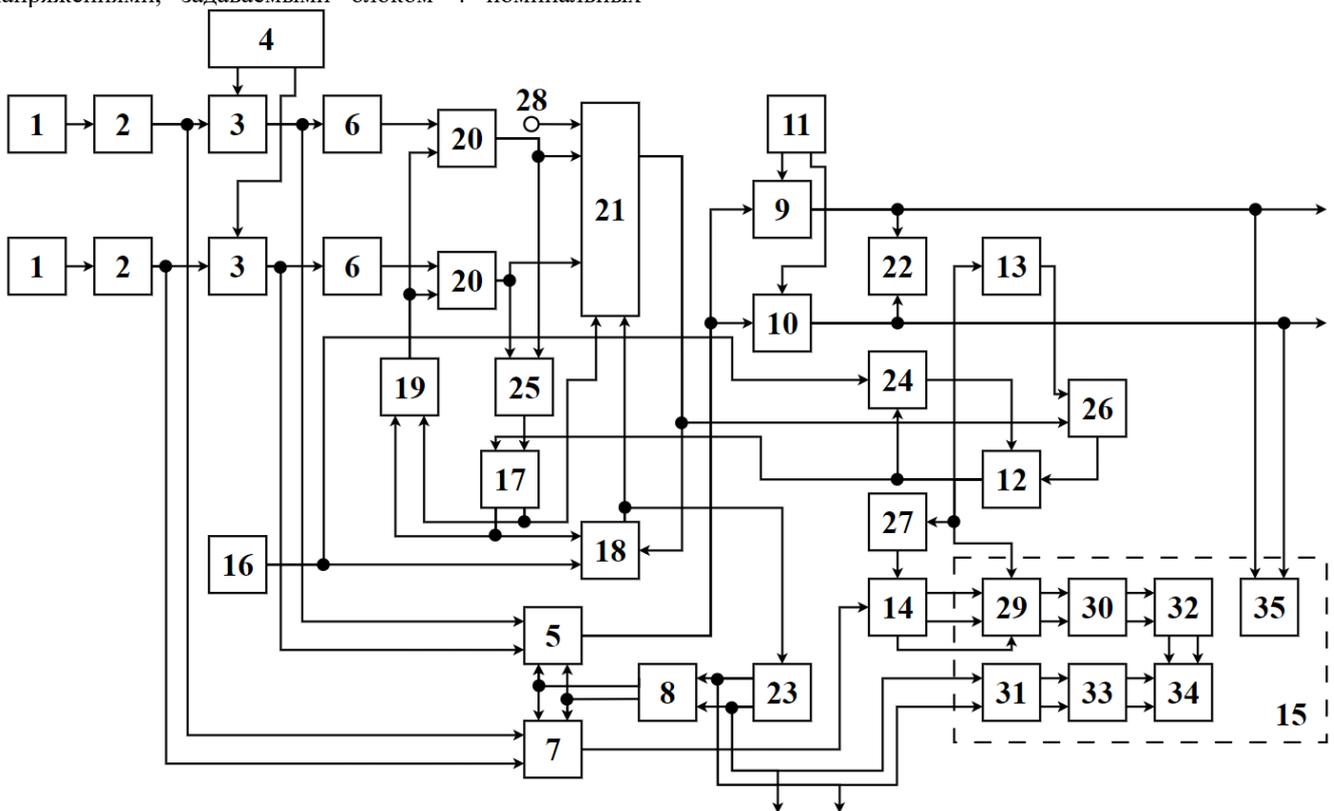


Рис. 2. Структурная схема системы контроля и диагностирования с ускоренным анализом отклонений: 1 – датчик (первичный преобразователь); 2 – блок унификации; 3 – вычитающий блок; 4 – блок номинальных значений; 5,7 – коммутаторы; 8 – дешифратор; 9,10 – схемы сравнения; 11 – блок допустимых отклонений; 12,18,22,28 – элементы ИЛИ; 13 – элемент НЕ; 14 – аналого-цифровой преобразователь; 15 – блок индикации; 16 – генератор импульсов; 17 – группа элементов И; 19 – генератор линейно падающего напряжения; 20 – группа блоков сравнения; 21,26,27,31 – элементы И; 23,24,25 – счетчики; 29,30 – триггеры

Одновременно на выходе элемента ИЛИ 25 появляется логическая "1", которая переключает триггер 17. Логический "0" с первого выхода триггера 17 запрещает

дальнейшую запись в регистр 21, а логическая "1", появляющаяся на первом выходе триггера 17, сбрасывает генератор 19 в исходное состояние и

открывает элемент И 18. Импульсы от генератора 16 через открытый элемент И 18 поступают на вход счетчика 23 и на вход сдвига регистра 21. С каждым импульсом логическая "1", записанная в регистр 21, смещается на один разряд в сторону дополнительного разряда, а код счетчика 23 увеличивается на единицу. При появлении логической "1" в дополнительном разряде регистра 21 на инверсный вход элемента И 18 поступает сигнал, который закрывает элемент И 18, останавливая сдвиг и счет.

Двоичный код, записанный в счетчике 23, соответствует номеру выбранного канала. В случае, если максимальная разность достигается одновременно в нескольких каналах, срабатывают несколько схем сравнения 20, и логическая "1" записывается в несколько разрядов регистра 21. Сдвиг и счет прекращаются при появлении в дополнительном разряде регистра 21 ближайшей к нему логической "1", и в счетчике 23 фиксируется адрес соответствующего канала. Таким образом, при групповом поступлении запросов на опрос приоритет отдается каналу с меньшим номером.

Разностный сигнал с выхода вычитающего блока 3 выбранного канала через коммутатор 5 поступает на входы схем сравнения 9 и 10, где сравнивается с сигналом, задаваемым блоком 11 допустимых отклонений параметров. Если разность превышает допустимое отклонение, на выходах схем сравнения 9 и 10 появляется сигнал "1".

Этот сигнал через элемент ИЛИ 22 подготавливает элемент И 27 и через элемент НЕ 13 закрывает элемент И 26. Сигнал с выхода элемента И 27 запускает аналого-цифровой преобразователь 14, на вход которого подается напряжение, соответствующее значению параметра выбранного канала. Если ни один из контролируемых каналов не выходит за пределы допустимых значений, на выходах схем сравнения 9 и 10 устанавливается логический "0", который через элемент ИЛИ 22 запрещает запуск преобразователя 14 и инициирует новый цикл поиска канала.

В случае выхода параметра за пределы допустимых значений сигнал "1" с выходов схем сравнения 9 и 10 поступает на блок индикации 35 для отображения результатов контроля ("Больше", "Меньше") и на регуляторы для корректировки параметров.

Код значения выбранного параметра с выхода аналого-цифрового преобразователя 14 по сигналу "Конец преобразования" записывается в регистр 29. Одновременно код адреса выбранного канала с счетчика 23 поступает на преобразователь 31 двоичного кода в двоично-десятичный.

Коды значений параметра и адреса канала через преобразователи 30 и 31 и дешифраторы 32 и 33 передаются на цифровые индикаторы 34.

На выход системы выводится адрес канала, требующего регулирования, что позволяет подключить соответствующий регулятор. По завершении процесса регулирования на выходах схем сравнения 9 и 10 устанавливается сигнал "0" ("Норма"), который через элементы НЕ 13, И 26 и ИЛИ 12 переводит триггер 17 в состояние "1", инициируя новый цикл опроса.

Если регулирование выбранного параметра невозможно, через заданное время на выходе счетчика 24 появляется сигнал переполнения, который через элемент ИЛИ 12 подготавливает систему к новому циклу опроса.

#### IV. ОЦЕНКА БЫСТРОДЕЙСТВИЯ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИРОВАНИЯ С УСКОРЕННЫМ АНАЛИЗОМ ОТКЛОНЕНИЙ

Проведем оценку выигрыша по быстродействию в предложенной системе. Время, необходимое для выбора канала, можно условно разбить на два периода. В первом периоде осуществляется сравнение выходных напряжений блоков 6 с выходным напряжением генератора линейно падающего напряжения 19. Во втором периоде путем опроса дешифратора 8 элементов И 17 выбирается канал для контроля, индикации и регулирования. Длительность первого периода можно оценить, задавшись величиной относительной погрешности  $\beta$  при появлении наибольшей в данный момент разности на выходах блоков.

Очевидно, что  $\beta$  определяет число  $n$  ступеней выходного напряжения генератора 19 по формуле

$$n = 1/\beta.$$

Время между срабатыванием блоков 20 сравнения и появлением запрета на изменение напряжения генератора линейно изменяющего напряжения 19 определяет минимальную длительность ступени.

Оно складывается из времени  $t_1$  задержки распространения сигнала элементом ИЛИ 18 и времени  $t_2$  срабатывания триггера 29, т.е.  $t = t_1 + t_2$ . Если многоходовый элемент ИЛИ 18 строится на основе соединенных «пирамидой» двухходовых элементов ИЛИ, время  $t_1$  можно рассчитать по формуле.

$$t_1 = t_n \log_2 N,$$

где  $t_n$  – время задержки двухходового элемента ИЛИ;  $N$  – число каналов.

При условии, что время срабатывания триггера  $t_2 = t_n$ , общая формула принимает вид:

$$t = t_n (1 + \log_2 N).$$

В худшем случае, когда разности текущих и номинальных значений параметров во всех каналах близки к нулю, происходит перебор всех (почти всех) ступеней выходного напряжения генератора 19. Длительность первого периода определяется выражением:

$$T_1 = n \cdot t = (t_n / \beta) (1 + \log_2 N).$$

Длительность второго периода определяется местом нахождения выбираемого канала в порядке опроса, а частота опроса (частота генератора 16) ограничивается быстродействием элемента ИЛИ 28 и триггера 30, т.е. в худшем случае:

$$T_2 = t_n N(1 + \log_2 N).$$

Таким образом, время выбора канала в системе:

$$T = (Nt_n + t_n / \beta)(1 + \log_2 N).$$

Если же говорить о системе, в которой осуществляется последовательный анализ разностей [5] текущих и номинальных значений параметров, то время выбора канала с максимальной разностью пропорционально числу каналов, т. е.

$$T' = \tau N,$$

где  $\tau$  – время, необходимое для анализа разности одного канала, которое складывается из времени  $t_k$  подключения выходного сигнала вычитающего блока ко входу амплитудного дискриминатора через коммутатор и из времени запоминания сигнала  $t_{зан}$  в "памяти" дискриминатора. При этом:

$$t_{зан} = -RC \ln(\beta).$$

где  $R$  – сумма внутреннего сопротивления вычитающего блока, открытого ключа коммутатора и внутреннего сопротивления открытого диода;  $C$  – емкость конденсатора "памяти" амплитудного дискриминатора.

Общее время выбора канала в системе с последовательным анализом:

$$T' = N(t_k - t_{зан}).$$

Таким образом, увеличение числа контролируемых и диагностируемых параметров ведет к линейному росту времени анализа (времени выбора канала) измерительной информации.

## V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный алгоритм и разработанная структурная схема позволяют создавать системы технической диагностики, обеспечивающие автоматизированный мониторинг и одновременное диагностирование множества однотипных электроэнергетических объектов, таких как судовые электрические сети, аккумуляторные или солнечные батареи, а также обмотки размагничивания кораблей [6]. Проведенный анализ быстродействия позволяет говорить о кратном повышении эффективности системы контроля и диагностирования с ускоренным анализом отклонений, в котором реализуется адаптивный алгоритм работы. Например, при допустимой ошибке в выявлении максимальной разности, равной 2 %, и числе каналов  $N = 32$  предлагаемая система дает 200-кратное увеличение быстродействия по сравнению с системой с последовательным анализом отклонений. При увеличении количества каналов преимущество предлагаемой системы контроля и диагностирования с ускоренным анализом отклонений становится еще более значительным.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] YueShi, WeihangZhu, YishaXiang, QianmeiFeng Condition-based maintenance optimization for multi-components system subject to system reliability requirement // Reliability Engineering & System Safety, Vol. 202, 2020. pp. 79-83 doi:10.1016/j.ress.2020.107042
- [2] 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
- [3] Фофанов О.Б. Алгоритмы и структуры данных: учебное пособие. Томск: Изд-во Томского политех.универ., 2014. 126 с.
- [4] Гайдук А.Р., Шадрин В.В. Алгоритмическое обеспечение адаптивных систем управления с идентификацией // Вестник ИГЭУ. 2018. №3. С.47-55.
- [5] Адаптивные телеизмерительные системы. / Авдеев Б.Я, Антонюк Е.М., Долинов С.Н., Журавин Л.Г., Семенов Е.И., Фремке А.В., под ред. А.В. Фремке Л.: Энергоатомиздат, 1981. 385 с.
- [6] В.И. Лачин, К.Ю. Соломенцев Информационно-измерительные системы контроля параметров многоэлементных электроэнергетических объектов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2011. №3. С.121-128.