

DOI 10.30898/1684-1719.2020.1.3

УДК 629.7.052

КОНТРОЛЬ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РЛС ДО С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОНТИНУАЛЬНЫХ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЕЙ

Н. Л. Дембицкий¹, А. С. Логовский², В. А. Панкратов², А. В. Тимошенко²

¹ Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
125993, Москва, Волоколамское шоссе, 4

² АО «Радиотехнический институт имени академика А.Л. Минца»,
127083, Москва, ул. 8 марта, 10/1

Статья поступила в редакцию 16 декабря 2019 г.

Аннотация. Одним из направлений эффективного решения задачи повышения качества эксплуатации радиолокационных станций дальнего обнаружения является непрерывный мониторинг стабильности параметров функциональных систем РЛС для оценки реального технического состояния изделия, и, как следствие, параметров его надежности. Результаты обработки данных мониторинга могут быть использованы для прогнозирования изменений параметров ТС, что позволяет эксплуатировать изделие до появления признаков опасного снижения надежности, исключив при этом преждевременные демонтажи узлов и агрегатов, а также выполнение других трудоемких работ, имеющих зачастую сомнительную полезность для надежности функционирования РЛС.

В работе предложен метод оценки функциональных характеристик функционально-алгоритмических систем радиолокационных станций дальнего обнаружения, основанный на применении континуальных процессоров, в которых совмещены логические и вычислительные возможности непрерывной параметрической оценки состояния функциональной системы. Предлагаемая альтернатива встроенным цифровым системам контроля обеспечивает оперативную обработку информации датчиков на всех уровнях конструктивного и функционального деления аппаратуры. Главной задачей такой системы является перераспределение вычислительной нагрузки между

распределенными по конструкторской иерархии вычислительными устройствами, которые обладают гораздо меньшей конструктивной и функциональной сложностью по сравнению с цифровыми процессорами, не требуют трудоемкой разработки программного обеспечения и повышают надежность систем функционального контроля.

Ключевые слова: функциональные системы, техническое состояние, континуальные процессоры, встроенный контроль, прогнозирование.

Abstract. One of the directions of effective solution of the task of improving the quality of operation of long-range radar stations is continuous monitoring of the stability of parameters of functional radar systems to assess the real technical condition of the product, and, consequently, the parameters of its reliability. The results of monitoring data processing can be used to predict changes in the technical condition parameters, which allow operating the product before the appearance of signs of a dangerous decrease in reliability, while eliminating the premature removal of assemblies and units, as well as other labor-intensive work, which is often of dubious usefulness for the reliability of radar operation.

The article suggests the method of evaluating functional characteristics of functional-algorithmic systems of long-range radar stations based on the application of continuum processors, which combine logical and computational capabilities of continuous parametric evaluation of the functional system state. The proposed alternative to the built-in digital control systems provides operational processing of sensor information at all levels of structural and functional division of equipment. The main task of such a system is to redistribute the computational load between computing devices distributed in the design hierarchy, which have much less constructive and functional complexity than digital processors, do not require labor-intensive software development and increase the reliability of functional control systems.

Keywords: functional systems, technical status, continuum processors, embedded control, prediction.

Актуальность

Современные радиолокационные станции (РЛС) представляют собой сложные аппаратно-программные комплексы крупноблочной структуры и в соответствии с требованиями назначения являются высоконадежными средствами. Для обеспечения высокого уровня технической готовности РЛС нового поколения содержат в своем составе большое количество аппаратуры оснащенной многочисленными датчиками контроля. Информация с датчиков регистрируется системой встроенного контроля (СВК) изделия, что позволяет определять отказы компонентов РЛС в реальном времени.

В условиях решения задач повышения боевой готовности принятие решений при управлении эксплуатацией РЛС должно основываться на информации о текущем и прогнозном техническом состоянии их элементов, ходе выполнения мероприятий, связанных с устранением неисправностей, доработками и заменой оборудования.

Таким образом, для эффективного управления эксплуатацией РЛС требуется—внедрение автоматизированной информационной системы поддержки управления эксплуатацией, включающей систему управления базами данных, аппаратно-программные средства контроля и прогнозирования технического состояния (с высокой точностью), информационно-справочные программные средства и системы поддержки принятия решений.

Актуальность разработки технологий и методов управления эксплуатацией подтверждается также требованиями Национальной стратегии развития искусственного интеллекта на период до 2030 г. [8], в числе приоритетных направлений которой определено прогнозирование отказов оборудования и его превентивное техническое обслуживание.

Для РЛС мониторинга обстановки актуальным является прогноз показателей ее функциональных систем с горизонтом прогнозирования не менее 30 минут, что относится к классу краткосрочных прогнозов.

Наиболее критичными функциональными характеристиками, от значений которых напрямую зависит выполнение задач РЛС по предназначению,

являются обнаружение цели с заданными вероятностными характеристикам, оценка дальности, азимута, угла места и доплеровской скорости с заданными точностными характеристиками и т.д.

На основе функциональных задач РЛС в ее составе формируются функционально-алгоритмические системы (ФАС). Такие системы представляют совокупность аппаратных и программных конструкторско-технологических систем, обеспечивающих решение конкретных функциональных задач и обладают свойством перестроения своей структуры при изменении требований к характеристикам РЛС или условий ее эксплуатации, с возможностью сохранения конструкторско-технических решений по основным комплексам, блокам и модулям [1].

РЛС будет считаться работоспособной, если все ее функциональные характеристики лежат в пределах допуска. Если хотя бы одна из функциональных характеристик выходит за допустимые пределы, РЛС становится неработоспособной. Полнота контроля технических объектов оценивается по формуле [15,16]:

$$\eta = \frac{\lambda_k}{\lambda_o}, \quad (1)$$

где λ_o – интенсивность отказов объекта контроля, а λ_k – интенсивность отказов контролируемой части объекта контроля. В этих условиях показатель полноты контроля необходимо обеспечить на уровне приближающимся к единице.

В [2] было показано, что параметрами, характеризующими техническое состояние (ТС) элементов ФАС, могут быть:

- импульсная мощность излучения передатчика;
- чувствительность приемника;
- потери в волноводном тракте;
- длительность интервала когерентного накопления;
- несущая частота;
- значения пульсации амплитуды зондирующего сигнала;
- значения фазовой ошибки при фазовой манипуляции несущей частоты;

- крутизна фронтов кодирующих импульсов;
- динамический диапазон тракта обработки сигнала;
- значения питающих напряжений и потребляющих токов;
- температурные показатели отдельных блоков и узлов.

В существующей системе встроенного контроля поток информации о ТС элементов ФАС является основной нагрузкой на средства управления хранением данных. Каждое сообщение о ТС является кодограммой универсального формата и занимает около 100 байт. При этом число элементов в изделии может достигать 50 тысяч, что обуславливает большой поток информации, постоянно поступающей с высоким темпом в СУБД.

Постановка задачи

Отработка структуры и параметров математической модели систем функционального контроля является одной из наиболее сложных задач разработки комплексов РЭА. Имея такую модель, можно значительно снизить риски сбоев и отказов. Отлаженная на этапах проектирования и испытаний математическая модель закладывается в ФАС изделия.

Функциональные характеристики ФАС определяются большим количеством различных данных как о состоянии ее элементов, так и об их параметрах, оперативная обработка которых является трудоемкой задачей. Они связаны между собой аналитическими и логическими зависимостями. Это порождает комбинаторные функционально-логические задачи, в которых многомерные функции оценки характеристик ФАС находятся в причинно-следственных логических связях. Что в свою очередь обуславливает необходимость разработки специализированной системы оценки функциональных характеристик ФАС РЛС. Данная система должна сочетать сложные аналитические расчеты с логическими выкладками, определяющими причинно-следственные связи параметров и характеристик. По результатам логического анализа делается заключение о техническом состоянии ФАС РЛС.

Известно, что для логического анализа в сложных системах функционального контроля эффективны методы искусственного интеллекта на

основе обработки знаний [3]. Такие системы требуют циклической обработки правил и фактов, определяющих знания об объекте функционального контроля [4]. Сканирование базы знаний требует большого количества вычислительных ресурсов и временных затрат. Передача задачи контроля технического состояния элементов ФАС и значений ее функциональных характеристик в центральный вычислитель значительно усложняет его программное обеспечение, что приводит к снижению скорости решения тактических задач, снижению надежности и увеличению трудоемкости разработки алгоритмов управления.

Альтернатива централизованной системе контроля приведена в работе [5]. В ней предложено распределить функции контроля в отдельных системах, узлах и агрегатах самолета. *Разрабатывая распределенные системы контроля, следует учитывать, что при фрагментации вычислительных нагрузок необходимо обеспечить высокую скорость информационного трафика между всеми вычислителями.* Обработка внутрисетевого протокола приводит к значительным задержкам передачи данных, ограничивает быстродействие и усложняет структуру распределенной системы функционального контроля.

Управление и контроль процессами эксплуатации РЛС, в том числе система оценки функциональных характеристик требует использования компьютерной техники в промышленном исполнении, отвечающей наиболее жестким требованиям в смысле надежности, стоимости и безопасности. К таким требованиям относятся:

- соответствие нормативам "реального времени" (в т.ч. и "жесткого реального времени");
- способность адаптироваться как к изменениям параметров среды в темпе с этими изменениями, так и к условиям работы информационно-управляющего комплекса;
- способность работать в течение всего гарантийного срока без обслуживания (бесперебойная работа годами).

Учитывая сложность систем функционального контроля РЛС и необходимость увязывания в реальном масштабе времени сотен параметров различных блоков, распределенные *цифровые* структуры не позволят добиться требуемой скорости работы системы оперативной оценки функциональных характеристик.

Исходя из приведенных выше условий, вычислительная сложность решаемой задачи функционального контроля определяется не только трудоемкостью расчета функциональных характеристик $F=\{f_1, f_2, \dots, f_N\}$, но и их логическими связями, а также необходимостью выполнения функционально-логического анализа.

Контролируемые параметры $Z=\{z_1, z_2, \dots, z_N\}$ изменяются во времени и функционально зависят от других параметров $z_i=f_i(x_1, x_2, \dots, x_M, t)$. Область определения характеристик $F=\{f_1, f_2, \dots, f_N\}$ ограничивается множеством Θ допустимых значений параметров $X=(Y, Z)$, где $Y=\{y_1, y_2, \dots, y_s\}$ - значения параметров внешней среды, $Z=\{z_1, z_2, \dots, z_t\}$ - значения параметров ФАС. Обобщенной математической моделью работоспособной РЛС является N -мерная область Q , внутри которой должны находиться все функциональные характеристики ФАС РЛС. Модель можно представить в математическом виде:

$$\nexists f_i \in F: \{f_i(x_1, x_2, \dots, x_M, t) \notin Q, i = 1 \div N, \forall \bar{x} \in X, \bar{x} \in \Theta\} \quad (2)$$

Вторым аспектом задачи функционального контроля является влияние режимов функционирования РЛС на взаимозависимости параметров ФАС. Изменение режима работы станции приводит к изменению функциональных связей всей системы. Таким образом, проявляется логическая компонента системы функционального контроля, устанавливающая зависимости ее характеристик от состояния объекта контроля. Математически это можно представить в виде системы продукционных правил.

Семантическая сетевая модель определяет взаимосвязи между исходными данными и процедурами, с помощью которых выполняется обработка информации. Такое представление могут дать структурные модели систем функционального контроля.

Определим на множестве функций $F_i \subset F$ для i -го режима работы ФАС и множестве параметров X отображения Δ и Γ : $\Delta(F_i) \subset X$ и $\Gamma(X) \subset F_i$. Отображение Δ определяет для каждой функции F_i множество исходных данных $\Delta(F_i) \subset X$, необходимых для ее выполнения. Отображение Γ определяет для каждого параметра x_j ФАС множество функций $\Gamma(x_j) \subset F$, которые могут быть активизированы для получения x_j .

Таким образом, структурной моделью базы знаний для i -го режима работы ФАС является двудольный, направленный граф: $H=(F_i \cup X, \Delta, \Gamma)=(F_i \cup X, R \cup E)$, в котором F_i – множество вершин, соответствующих функциональным зависимостям параметров, X – исходные данные и результаты вычислений параметров, R – дуги из X в F_i определяющие однозначное соответствие вершин из F_i вершинам X , E – дуги из F_i в X , определяющие множество исходных данных необходимых для активизации функции F_i . Назовем такой граф структурной моделью знаний о правилах формирования сигналов ФАС РЛС. Исходным данным задачи соответствуют вершины $X_{in} \subset X$. Очевидно, что X_{in} имеют нулевую полустепень захода, т.к. им соответствуют параметры, полученные не в результате выполнения расчетов, а заданные на входе модели ФАС. Исходными данными являются значения параметров, допуски и функциональные характеристики стимулирующих сигналов объекта контроля.

Оба представленных аспекта концепции необходимо учитывать при разработке вычислительных устройств распределенной системы функционального контроля РЛС на основе обработки знаний.

Целью данной работы является создание распределенной вычислительной сети, выполняющей непрерывный мониторинг функциональных характеристик ФАС РЛС (Рис. 1).

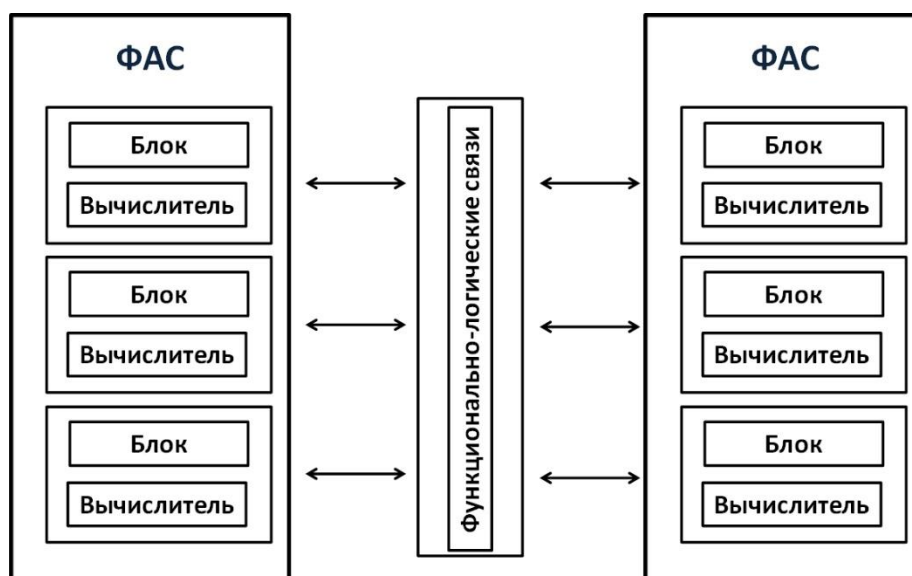


Рис. 1. Распределенная сеть встроенных вычислителей мониторинга характеристик ФАС.

Предлагаемая альтернатива встроенным цифровым системам контроля, основанная на применении континуальных процессоров, обеспечивает оперативную обработку информации датчиков на всех уровнях конструктивного и функционального деления аппаратуры. Главной задачей такой системы является перераспределение вычислительной нагрузки между распределенными по конструкторской иерархии вычислительными устройствами, которые обладают гораздо меньшей конструктивной и функциональной сложностью по сравнению с цифровыми процессорами, не требуют трудоемкой разработки программного обеспечения, повышают надежность систем функционального контроля за счет резервирования и кворумирования сигналов.

Континуальные процессоры вычислительной сети системы оценки функциональных характеристик

Базовым элементом распределенной вычислительной сети системы оценки функциональных характеристик является *континуальный процессор* (КП) [6], под которым понимается устройство, выполняющее непрерывную обработку потоков телеметрической информации с помощью логических и функциональных преобразований аналоговых сигналов, характеризующих параметры и характеристики ФАС. В КП применяется аналоговая логика,

которая основана на вычислении и сравнении непрерывных функций. В КП проведена унификация методов представления информации, которая позволяет соединять их в сложные логические сети и выполнять все преобразования аппаратными средствами, настройка которых осуществляется методами обучения. В КП соединяются непрерывность обработки функций свойственная аналоговым вычислителям, логический анализ цифровых схем и методы обучения систем искусственного интеллекта (Рис.2).

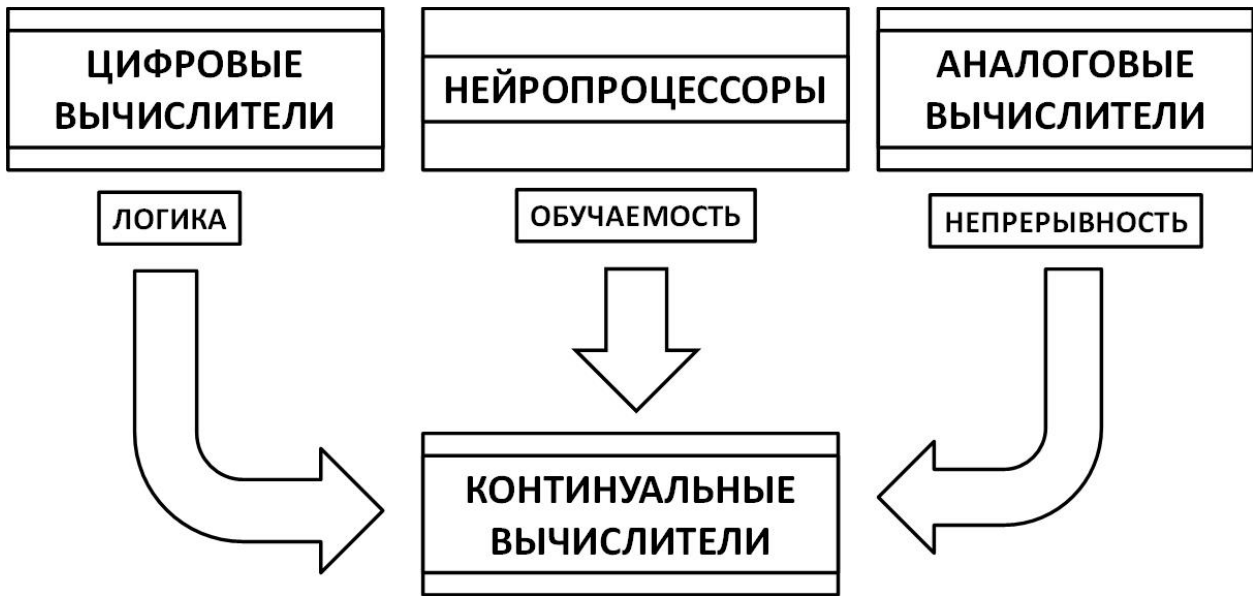


Рис. 2. Функциональные возможности континуальных вычислительных устройств.

Логика работы КП основывается на обработке высказываний о соотношениях между значениями функций, характеризующими параметры блоков ФАС. Обработка высказываний может быть записана в виде предиката:

$$\text{if } \theta(x_1, x_2, \dots, x_n, t) \wedge \varphi(x_1, x_2, \dots, x_n, t) \wedge \psi(f, x_1, x_2, \dots, x_n, t) \text{ then } q(t) = 1 \quad (3)$$

$$\text{if } q(t) = 1 \text{ then } r(t) = f(x_1, x_2, \dots, x_n, t) \quad (4)$$

где t - время, $q(t)$ - бинарная функция, $r(t)$ - результат вычислений, x_1, x_2, \dots, x_n – входные сигналы (параметры); θ, φ, ψ – бинарные функции; θ – проверка условий расчета характеристики блока, φ – проверка готовности исходных данных для выполнения расчета, ψ - проверка ограничений на характеристику блока, f – функция расчета характеристики блока.

Особенностью работы КП является коммутация электронным ключом выходной цепи передачи результата вычислений $r(t)$. КП перестает передавать в сеть значения расчетной функции $f(t)$ в случае невыполнения хотя бы одного из условий θ , φ или ψ , но продолжает непрерывно влиять на логику обработки данных системы оценки функциональных характеристик передач в сеть логического уровня бинарной функции $q(t)$. Этот сигнал используется:

- для подтверждения передачи значения $r(t)$ расчетной функции $f(t)$ в сеть,
- для принятия сетью решений об использовании результата $r(t)$ в оценке характеристик ФАС,
- для блокирования участия характеристики $f(t)$ в процессе вычислений.

Благодаря проверке условий θ , φ , ψ и применению ключевой схемы на функциональном выходе, появляется возможность оперативно в реальном масштабе времени перестраивать конфигурацию сети в зависимости от состояния задачи, что придает процессору принципиально новые возможности по сравнению с известными аналоговыми процессорами *FPAА (Field-programmable Analog Array)* [7]. Задержка срабатывания КП определяется выходными транзисторными ключами, время коммутации измеряется наносекундами, определяя высокие скоростные характеристики вычислительной сети системы оценки функциональных характеристик.

Записанные выражения (3) и (4) задают логические свойства КП в составе вычислительной сети системы оценки функциональных характеристик. В КП происходят непрерывные процессы ввода логических уровней $\varphi(t)$, $\psi(t)$, $\theta(t)$ и подачи на выход логического уровня $q(t)$, определяющего состояние вычислений. При объединении КП в сеть эти уровни непрерывно изменяются под воздействием изменений соотношений между входными сигналами (1) и (2). Введенные в КП свойства непрерывности вычислений определяют логическую континуальность вычислительной сети системы оценки функциональных характеристик и создают предпосылки для обработки причинно-следственных связей сигналов о состоянии блоков в режиме реального времени.

На рисунке 3 показан пример схемы управления мониторингом блока ФАС в трех режимах работы. Схема содержит три КП, выполняющих мультиплексирование контролируемых функций f_1 , f_2 , f_3 , при подаче стимулирующих сигналов X на функциональные входы трех КП. Режим мониторинга определяется бинарными функциям $\varphi(t)$, $\psi(t)$ и $\theta(t)$, проверку которых выполняет каждый из трех КП. При выполнении условий КП проверяет значения поданных параметров и в случае активации режима контроля с помощью логических схем ИЛИ-НЕ блокирует другие КП. Необходимым условием работы мультиплексора является несовместность выбираемых режимов.

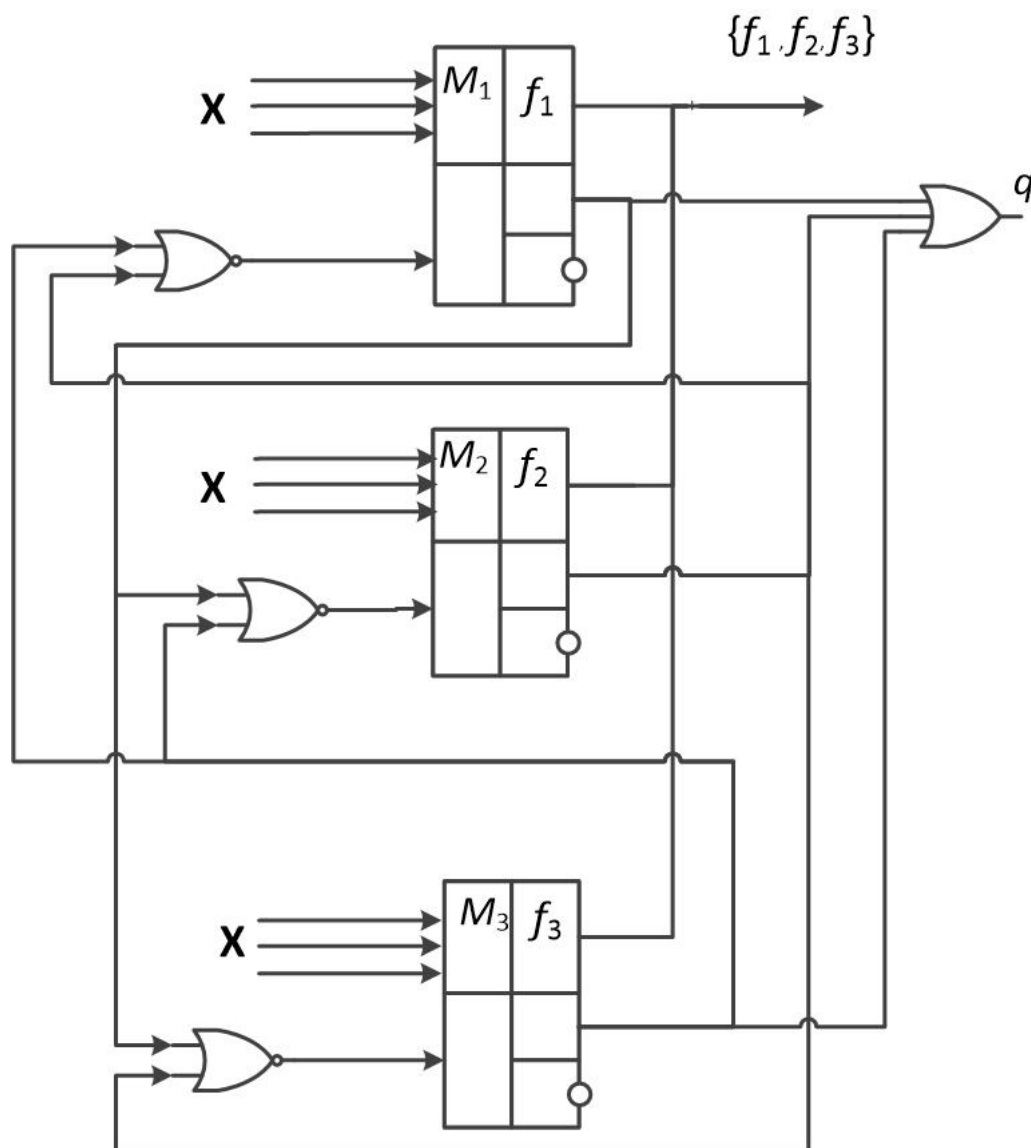


Рис. 3. Мультиплексор выбора функций мониторинга параметров блок.

Главной особенностью КП по сравнению с цифровыми вычислителями является способность интерполяционными методами выполнять расчеты нелинейных функций в непрерывной области их определения. Уход от дискретизации вычислений позволяет получать расчетные значения функций в непрерывном режиме, который вместе с логической обработкой состояний системы, можно интерпретировать как «режим реального времени». Если рассмотреть обобщенную модель характеристик ФАС и блоков (1), то в каждый момент времени t система должна находиться в детерминированном состоянии. Оно определяется значениями взаимосвязанных функциональных характеристик $F=\{f_1, f_2, \dots, f_N\}$. При их изменении меняются уровни сигналов КП (см. выражения (3) и (4)), т.е. изменяются состояния вычислительной сети системы оценки функциональных характеристик.

Непрерывное вычисление значений функций f_1, f_2, \dots, f_N является важнейшим свойством КП. Этот вычислительный процесс основан на методах интерполяции. Каждая функциональная характеристика представлена в виде табличных значений, хранящихся в аналоговой памяти. В процессор встроены схемы выборки из памяти крайних значений функции в области вычислений и интерполяции функции в точке, определяемой значениями входных параметров. Темп вычислений определяется транзисторными ключами в цепях управления и составляет доли микросекунды.

Для формирования таблиц функций могут применяться аппаратные методы обучения, которые превращают КП в устройство со свойствами систем искусственного интеллекта. Это облегчает его настройку на конкретную задачу, упрощает разработку и наладку системы оценки функциональных характеристик. Процесс обучения позволяет настраивать процессор на формирование функции $f(t)$, используя образцовые сигналы реакции КП на входные параметры $X(t)$. В память КП записывается модель реакции системы оценки функциональных характеристик на мгновенные значения контролируемых параметров.

Структура КП содержит три основных компонента: аналоговую память, синтезатор аналоговых сигналов и логические схемы управления.

Аналоговая память осуществляет оперативную запись и считывание аналоговых значений параметров. Аналоговые схемы позволяют выполнять долговременное хранение данных, отказавшись от цифровой памяти. Для аналогового моделирования функций используются либо интерполяционные сплайновые генераторы СС, либо схемы аналоговых преобразований сигналов. Схемы управления построены на асинхронных логических элементах.

Принцип работы распределенной сети функционального контроля

Главным показателем эффективности системы оценки функциональных характеристик является оперативность получения результатов, которая определяется допустимым временем принятия решений. При высокой плотности данных в контуре оценки параметров возможны значительные задержки обработки, связанные с задержками в каналах передачи информации и с трудоемкостью принятия решений. Точность экспертных систем определяется полнотой заложенных в них знаний. Таким образом, в системе функционального контроля РЛС возникает противоречие между минимально необходимым объемом знаний и быстродействием получения решений. В этих условиях цифровые системы теряют свою эффективность, т.к. выполняют последовательный логический вывод из многочисленных продукционных правил принятия решений, а работа чисто цифровой системы функционального контроля в реальном масштабе времени, когда требуется согласованная мгновенная оценка состояния множества взаимодействующих процессов, становится проблематичной. Даже в случае применения нескольких цифровых вычислителей проблема быстродействия остается нерешенной, т.к. сетевой трафик становится камнем преткновения ускорения обработки информационных потоков в ДС.

Другим немаловажным аспектом построения системы функционального контроля РЛС является формирование базы знаний. В отличие от широко распространенных экспертных систем [9,10,11,12,13,14] в распределенной

системе контроля под системой знаний понимается совокупность функционально-логических зависимостей, связывающих характеристики блоков РЛС с признаками наступления отказов ФАС. Наличие большого числа функциональных и логических связей между оцениваемыми процессами приводит к лавинному росту объема и повышению сложности программного обеспечения специализированной экспертной системы. Усложнение программ в свою очередь всегда связано с ростом сложности их отладки и верификации, риском появления непредусмотренных отладочными тестами ошибок, которые недопустимы в условиях боевого применения.

Для принятия решения о выборе значений функции оценки ФАС $f_j \in F_i$ необходимо выполнить многовариантный анализ состояния процессов по параметрам из $X_i(t)$, т.к. зависимость $f_j(t)$ от $X_i(t)$ может быть не только аналитической, но и логической. Часто она задается в форме предикатов (3), (4), определяющих условия выбора функции f_j . В таких условиях программа потребует включения логического анализа. Циклический поиск решений в контуре оценки параметров может значительно ухудшить скорость принятия решения, а любая задержка в процессе выбора функций F_i в жестких ограничениях на минимальное быстродействие может привести к потере времени на восстановление работоспособности РЛС.

Предлагаемый подход базируется на создании сети функционального контроля (СФК) КП, которая свободна от многих недостатков системы оценки функциональных характеристик с центральным процессором. На рисунке 4 показаны потоки информации в СФК системы оценки функциональных характеристик.

Способность сочетать аналитические расчеты с логическим анализом состояния процессов и проведенная унификация КП позволяет конструктивно рассредоточить вычислители по отдельным ФАС и блокам РЛС. В каждой ФАС и блоке локализуются все действия, необходимые как для определения состояния процессов, влияющих на отказы, так и для передачи в систему значений функциональных характеристик. ФАС или блок с прикрепленными

КП образуют функциональный-логический *кластер* синтеза сигналов оценки параметров.

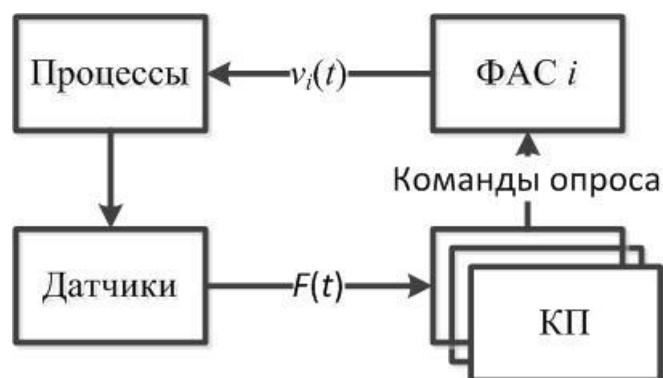


Рис. 4. Контур функционального контроля ФАС.

По своим возможностям СФК РЛС напоминает нейросеть, связывающую взаимодействующие органы в живых организмах. Каждый КП контролирует состояние влияющих процессов и при выполнении необходимых условий подключает функцию оценки работоспособности.

Одним из свойств распределенной СФК является независимое включение новых компонентов. Каждый компонент реагирует только на команды, синтезированные в его кластере. Поэтому поведенческие функции агрегата могут быть полностью заданы логикой обработки внутри кластера. При модернизации *i*-й ФАС нет необходимости радикально пересматривать результаты оценки функциональных характеристик всей РЛС поскольку работа *i*-го кластера зависит только от состояния, связанных с ним КП и датчиков. Все сигналы СФК унифицированы. Включение же в систему нового кластера не требует трудоемкой стыковки сигналов с существующей НС.

Встраивание систем контроля в структуру РЛС

Функциональный-логический кластер оценки параметров ФАС содержит *k* КП, задающих определенный режим обработки информации. Режим контроля в *i*-м КП кластера можно представить в виде предиката:

$$\text{if } \theta_i(x_1, x_2, \dots, x_n, t) \wedge \varphi_i(x_1, x_2, \dots, x_n, t) \wedge \psi_i(f_i, x_1, x_2, \dots, x_n, t) \text{ then } q_i(t) = 1 \quad (5)$$

$$\text{if } q_i(t) = 1 \text{ then } r_i(t) = f_i(x_1, x_2, \dots, x_n, t) \quad (6)$$

На вход КП непрерывно поддается значение параметра f_i , получаемое при заданных стимулирующих сигналах $x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$. Условия расчета $\theta(t)$ и $\varphi(t)$ определяют возможность применения i -го метода контроля. КП проверяет нахождение значения параметра f_i в поле допуска:

$$\varepsilon_i^{min} < f_i(x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)) < \varepsilon_i^{max}.$$

Если ФАС по проверяемому параметру работоспособен, то бинарная функция $\psi_i=1$, и на выход КП передается значение параметра $r_i(t) = f_i(x_1, x_2, \dots, x_n, t)$ и логический сигнал $q_i(t)=1$. В противном случае функциональный выход блокируется, а на логический выход подается сигнал $q_i(t)=0$. Значение параметра $r_i(t)$ может быть использовано для дальнейшей обработки состояния объекта контроля, а логический сигнал q_i для оповещения сети о работоспособности объекта контроля.

Режимы работы КП в кластере несовместны. На выход кластера может подаваться сигнал только одного КП. При выполнении режима контроля i -м КП размыканием ключей в цепи управляющего сигнала автоматически блокируются команды с других КП того же кластера. Следовательно, можно объединять подключенные к объекту контроля функциональные выходы КП. Логические выходы КП объединяются через логический вентиль, выполняющий функцию ИЛИ (Рис. 3).

На рисунке 5 показана структура СФК РЛС. К объекту контроля подключается несколько КП, каждый из которых задает определенный режим оценки параметров в зависимости от параметров, поступающих с датчиков. Соединение КП задает логику их взаимодействия при выполнении команд.

В сети параллельно активируются все вычисления, для которых выполнены условия режима контроля. Выбор активного КП в j -м кластере определяется логикой взаимодействия кластеров, внутренней логикой кластера и значениями параметров, поступающих с датчиков. Вычисления выполняются в темпе изменения состояний кластеров, который зависит от быстродействия

транзисторных ключей в выходных цепях КП. Средний темп контроля параметров составляет около одного мегагерца по всей сети.

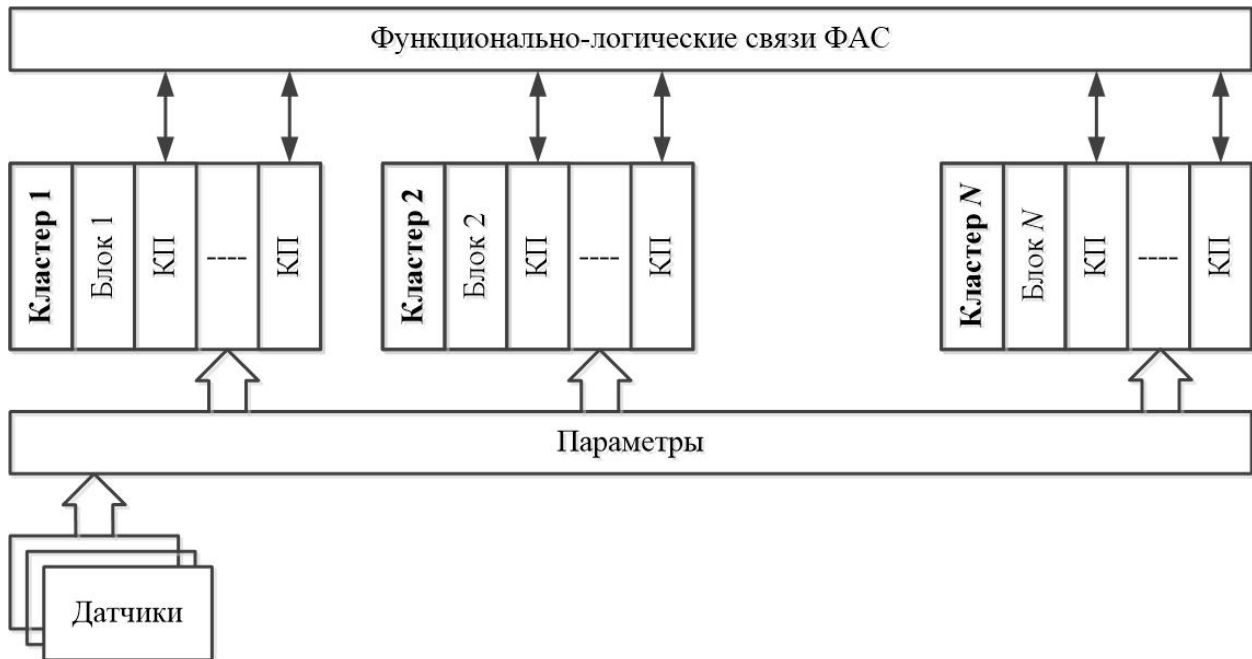


Рис. 5. Структура сети функционального контроля ФАС.

Важнейшим свойством СФК является возможность оперативной адаптации к условиям применения. Расчетные функции либо синтезируются в процессе обучения КП, либо задаются по известным зависимостям выходного сигнала от параметров x_1, x_2, \dots, x_n . В ходе обучения КП получают образцовые значения функций при заданных параметрах ФАС Z^* в исследованных дискретных точках области контроля. В процессе подготовки сети к эксплуатации полученные образцовые значения используются для прошивки постоянного аналогового запоминающего устройства КП.

Заключение

Распределенные континуальные системы обладают значительными преимуществами в скорости обработки информации по сравнению с цифровыми системами, которая достигается за счет параллельных вычислений и непрерывного взаимодействия кластеров КП в реальном масштабе времени. Скорость обработки континуальным процессором сигналов определяется:

ключевыми схемами в цепях аналоговой логики (быстродействие около ста наносекунд),

аналоговыми методами вычислений значений функций,

отказом от цифрового трафика передачи информации о функциональных характеристиках.

Быстродействие континуальных сетей позволяет встраивать в комплекс оперативной оценки функциональных характеристик РЛС системы обработки знаний оценки состояния ФАС.

При настройке СФК используется обучение континуальных процессоров методами моделирования, заменяющее программирование расчетных алгоритмов. Применение обучаемых процессоров снижает трудоемкость разработки и уменьшает риски появления сбоев в программном обеспечении СФК.

Проведенная в КП унификация сигналов комплексной оценки состояния контролируемых характеристик ФАС и упрощение аппаратных решений позволяет повысить надежность и робастность СФК, расширив возможности применения кворумирования функций мониторинга и резервирования цепочек принятия решений.

Литература

1. Боев С.Ф., Казанцев А.М., Панкратов В.А., Дембицкий Д.Н., Петраков А.М. Событийная модель оценки рисков создания РЛС ДО // Труды МАИ. 2016. Выпуск № 80. 21с.
2. Давыдов Н.С., Техническая диагностика радиоэлектронных устройств и систем. — М.: Радио и связь, 1988 г, — 256 с.
3. Сафонов В.О. Экспертные системы - интеллектуальные помощники специалистов / В. О. Сафонов. - СПб: Санкт-Петербургская организация общества “Знания”, 2005. – 257 с.
4. Джексон П. Введение в экспертные системы. М.: Издательский дом «И.Д.Вильямс», 2001 г., 624 с., ил.

5. Воробьев А.А., Лагойко О.С. Информационно-диагностические системы встроенного контроля состояния воздушных судов. Программные системы и вычислительные методы – №4(9). 2014. DOI: [10.7256/2305-6061.2014.4.13995](https://doi.org/10.7256/2305-6061.2014.4.13995).
6. Дембицкий Н.Л. Аналоговые процессоры с функциями управления вычислениями. // Авиакосмическое приборостроение. №6. 2018 г., С. 28-34.
7. Bratt A. & Macbeth I. DPAD2- a Field Programmable Analog Array. // Analog Integrated Circuits and Signal Processin. 1998. Vol.17. P. 67-89.
8. Указ Президента Российской Федерации от 10.10.2019 г. № 490 <http://kremlin.ru/acts/bank/44731>
9. Козлова Т.Д., Игнатъев А.А., Самойлова Е.М. Реализация экспертной системы поддержки принятия решений для определения неисправностей технологической системы // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2011. №2. С. 219-224.,
10. Коптелова И.А., Силкин И.М. Экспертная система диагностирования силовых трансформаторов систем электроснабжения // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2011. Т. 3. № 8 (81). С. 104-107,
11. Мазепа Р.Б., Киржаков В.Ю. Практические аспекты использования технологий экспертных систем реального времени для диагностики при проектировании сложных технических систем // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2005. № 2. С. 13-21.
12. Палюх Б.В., Какатунова Т.В., Дли М.И., Багузова О.В. Интеллектуальная система поддержки принятия решений по управлению сложными объектами с использованием динамических нечетких когнитивных карт // Программные продукты и системы. 2013. № 4. С. 30.,
13. Moreno C. J., Espejo E. A performance evaluation of three inference engines as expert systems for failure mode identification in shafts / /Engineering Failure Analysis. 2015. Т. 53. С. 24-35.

14. Liberado E. V. et al. Novel expert system for defining power quality compensators // Expert Systems with Applications. 2015. Т. 42. №. 7. С. 3562-3570.
15. Техническая диагностика. Контролепригодность. Общие требования. ГОСТ 26656-85. -М.: Из-во стандартов, 1985. – 15 с.
16. Техническая диагностика. Термины и определения. ГОСТ 20911-89. -М.: Из-во стандартов, 1985. – 8 с.

Для цитирования:

Дембицкий Н.Л., Логовский А.С., Панкратов В.А., Тимошенко А.В. Контроль функциональных характеристик РЛС ДО с использованием континуальных распределенных вычислителей. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2020. № 1. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jan20/3/text.pdf>. DOI 10.30898/1684-1719.2020.1.3