

Интеллектуальные, информационные и управляющие системы

Л.В. Савкин

специалист 1-й категории

E-mail: leonid.itmo@mail.ru

(ПАО «Радиофизика») г. Москва, Российская Федерация

В.Г. Дмитриев

инженер-схемотехник

E-mail: victor116@yandex.ru

Е.А. Федоров

аспирант

E-mail: grumenel@gmail.com

(ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина») г. Химки, Российская Федерация

В.И. Филатов

канд. техн. наук, старший научный сотрудник

E-mail: vfil10@mail.com

(ВА РВСН им. Петра Великого) г. Москва, Российская Федерация

П.А. Гусенков

студент

E-mail: pavel_sv@list.ru

(МФТИ) г. Долгопрудный, Российская Федерация

Нейрорегуляторы в бортовых системах космических аппаратов

В статье рассматриваются общие вопросы, связанные со способами аппаратно-программной реализации нейрорегуляторов в составе бортовых систем современных космических аппаратов.

В первой части статьи проведен анализ типичной структуры универсальных нейрорегуляторов, на примере нейрорегулятора первого порядка, выполненного на базе трехслойного персептрона с одним аппроксимирующим выходом.

Во второй части статьи рассмотрены общие особенности программной и аппаратной реализации нейрорегуляторов в составе бортовых систем космических аппаратов. Предложен общий принцип программной реализации нейрорегулятора, заключающийся в эмуляции искусственной нейронной сети в виде отдельного программного приложения, не входящего в состав функционального и служебного программного обеспечения бортового комплекса управления. Предложен общий принцип аппаратной реализации многоканального нейрорегулятора на базе программируемых логических интегральных схем. Проводится оценка достоинств и недостатков каждого из предложенных способов.

Ключевые слова: космический аппарат; бортовая система; бортовой комплекс управления; нейрорегулятор; искусственная нейронная сеть; программный; эмуляция; аппаратный.

L.V. Savkin

Expert 1st Category

E-mail: leonid.itmo@mail.ru

(PJSC «Radiofizika») Moscow, Russian Federation

V.G. Dmitriev

Circuit Design Engineer

E-mail: victor116@yandex.ru

E.A. Fedorov

Postgraduate Student, Software Engineer

E-mail: grumenel@gmail.com

(Federal Enterprise «Lavochkin Association») Khimki, Russian Federation

V.I. Filatov

Cand. of Techn. Sciences, Senior Research Associate

E-mail: vfil10@mail.com

(Military Academy of Strategic Rocket Forces) Moscow, Russian Federation

P.A. Gusenkov

Student

E-mail: pavel_sv@list.ru

(MIPT) Dolgoprudny, Russian Federation

Neuroregulators in Spacecraft Onboard Systems

In article the general questions of hardware-software neuroregulators implementation as a part of modern spacecrafts onboard systems are considered. In first part of article the analysis typical structure of the universal neuroregulators on the example feedforward neuroregulator on the basis three-layer perceptron with one approximating output is carried out. In second part of article the general features of neuroregulators program and hardware implementation as a part of spacecrafts onboard systems are considered. The general principle of neuroregulator program implementation consisting in emulation of an artificial neural network in the form stand-alone software application which isn't a part onboard control complex functional and official software is offered. The general principle of the multi-channel neuroregulator hardware implementation on the basis programmable logic integrated circuits is offered. The assessment of merits and demerits each of the offered methods is carried out.

Keywords: spacecraft; onboard system; onboard control complex; neuroregulator; artificial neural network; program; emulation; hardware.

Постановка вопроса

Развитие методов аналоговой и цифровой обработки информации с помощью искусственных нейронных сетей (ИНС) неоднократно подтверждало и продолжает подтверждать преимущества последних перед традиционными способами решения целого ряда важнейших прикладных задач. К некоторым из подобных задач можно отнести задачи классификации и распознавания образов, задачи принятия решения и оптимального управления при наличии неструктурированных и нестандартных массивов исходных данных, задачи выявления признаков новых типов кластеров в кластерном анализе, некоторые задачи прогнозирования состояния технических систем на основе оценки зависимостей между их входными и выходными данными и многие другие [1].

Наряду с вышеперечисленными примерами несколько последних десятилетий активно исследуется вопрос применения ИНС в качестве нейрорегуляторов для различного рода автоматизированных систем управления (АСУ). Ключевым достоинством нейрорегуляторов перед традиционными регуляторами АСУ с фиксированными параметрами является возможность оптимизации своих внутренних параметров (весовых коэффициентов) в условиях нечеткой информации, возникающей в процессе адаптации системы к постоянно изменяющимся во времени внешним и внутренним воздействующим факторам [2...5].

Еще одним немаловажным достоинством нейрорегуляторов является их в значительной степени универсальность. Она связана с возможностью применения одних и тех же типов нейрорегуляторов к различным с точки зрения назначения техническим и технологическим АСУ. При этом, безусловно, речь идет о таких АСУ, переходные процессы в которых описываются одинаковыми системами дифференциальных уравнений, имеют близкие статические и динамические характеристики.

Говоря об универсальности и преимуществах применения нейрорегуляторов в различных типах сложных технических систем управления, нельзя не рассматривать возможность их применения в составе некоторых типов бортовых систем современных космических аппаратов (КА). К подобным системам всегда можно отнести систему обеспечения теплового режима (СОТР), систему энергоснабжения (СЭС), систему управления двигательной установкой (ДУ), систему управления ориентацией и стабилизацией (СУОС) и в конечном итоге бортовой комплекс управления (БКУ) КА. Понятно, что для каждой отдельной бортовой системы КА требуется соответствующее отдельное рассмотрение того или иного типа нейрорегулятора с конкретной моделью ИНС. В рамках же данной небольшой статьи предлагается обсудить лишь общие вопросы, связанные

со способами аппаратно-программной реализации нейрорегуляторов в бортовых системах КА.

Цель работы – рассмотреть общие вопросы, касающиеся способов аппаратно-программной реализации нейрорегуляторов в составе различных бортовых систем КА на конкретном примере универсального нейрорегулятора.

Пример типичной структуры нейрорегулятора первого порядка

В настоящее время для синтеза объектов регулирования с нелинейными параметрами разработан целый ряд универсальных нейрорегуляторов, совмещающий в себе свойства различных стандартных регуляторов: интегрального, интегрально-пропорционального, интегрально-пропорционального дифференциального и других [2, 3].

Для того чтобы иметь общее представление о структуре подобных нейрорегуляторов, рассмотрим рисунок 1, на котором представлен пример трехслойного нейрорегулятора первого порядка с общим числом нейронов $N_{\text{общ}} = n + m + 1$, где n – количество нейронов в первом внешнем входном слое, m – число нейронов в скрытом слое.

Основным элементом данного нейрорегулятора является трехслойная перцептронная ИНС прямого распространения сигналов с одним аппроксимирующим выходом, реализующимся на выходном нейроне $S_1^{(3)}$ с функцией активации $f_1^{(3)}$. Верхний индекс, заключенный в треугольные скобки, указывает принадлежность элемента ИНС к одному из трех последовательных слоев, а индекс снизу указывает на условный порядковый номер рассматриваемого элемента в пределах выбранного слоя ИНС. Представленная сеть не предусматривает наличия внутренних обратных связей, однако в отдельных типах нейрорегуляторов и нейроанализаторов с функциями прогнозирования внутренние (межслойные) обратные связи являются обязательной составляющей топологии ИНС [4].

Входной вектор управляющей информации БКУ $X_{\text{БКУ}}$ подается в верхнюю точку ИНС $x_{\text{top}} = x_1^{(1)}$, откуда данные через набор весовых коэффициентов $\{w_{11}^{(1)}, w_{12}^{(1)}, w_{13}^{(1)}, \dots, w_{1n}^{(1)}\}$ поступают на суммирующие входы нейронов первого слоя $S_i^{(1)}, i = 1, n$. Через нижнюю точку ИНС $x_{\text{bot}} = x_2^{(1)}$ и соответствующий данному участку набор весовых коэффициентов $\{w_{21}^{(1)}, w_{22}^{(1)}, w_{23}^{(1)}, \dots, w_{2n}^{(1)}\}$ осуществляется распространение сигнала внешней обратной связи и регулировки ИНС. Этот сигнал в некоторых примерах нейрорегуляторов первого порядка [2, 3] представляет собой задержку выходного вектора управляющей информации БКУ $Y_{\text{БКУ}}$ на один такт. В общем же случае функцию, подаваемую в точку x_{bot} , можно представить в виде произведения

$$x_{\text{bot}} = Y_{\text{БКУ}} \cdot Z(Q_{\text{кор}}),$$

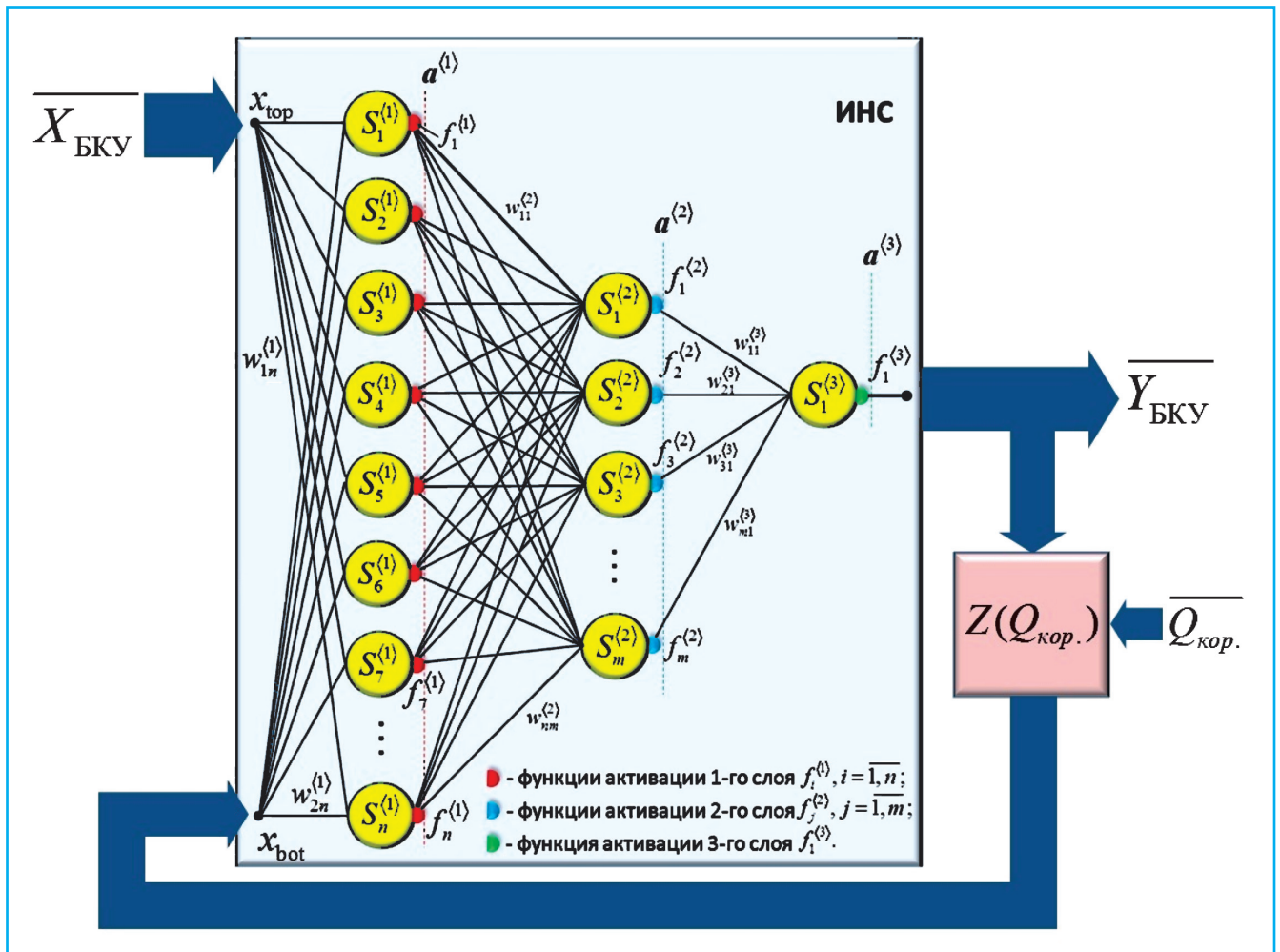


Рис. 1. Пример структуры трехслойного нейрорегулятора первого порядка

где $Z(Q_{\text{кор.}})$ – функция отрицательной обратной связи нейрорегулятора, зависящая от параметра дополнительной корректировки $Q_{\text{кор.}}$. В качестве последнего может выступать как задержка сигнала во времени на величину τ , так и конечная выборка параметров вектора $Y_{\text{БКУ}}$, требуемая для ускорения времени обучения ИНС.

На рисунке 1 представлены также функциональные сечения каналов прохождения сигналов в p -х слоях ИНС, которые описываются общим выражением

$$a^{(p)} = F^{(p)} = \mathbf{F}^{(p)}(\mathbf{S}^{(p)}), \quad (1)$$

где $a^{(p)}$ – функциональное сечение p -го слоя ИНС; $\mathbf{F}^{(p)}$ – вектор-функция активации p -го слоя ИНС; $\mathbf{S}^{(p)}$ – вектор-сумматор нейронов p -го слоя ИНС.

В соответствии с выражением (1), каналы прохождения сигналов, образующие функциональное сечение 1-го слоя, можно описать зависимостью вида

$$a_i^{(1)} = f_i^{(1)}(S_i^{(1)}) = f_i^{(1)}(x_{\text{top}} w_{1i}^{(1)} + x_{\text{bot}} w_{2i}^{(1)}) = f_i^{(1)}(x_1^{(1)} w_{1i}^{(1)} + x_2^{(1)} w_{2i}^{(1)}), i = \overline{1, n},$$

где $a_i^{(1)}$ – значение сигнала на выходе i -го канала 1-го слоя; $f_i^{(1)}$ – функция активации, реализующая заданное в ИНС функциональное преобразование над значением суммы $S_i^{(1)}$ на входе каждого формального нейрона.

Выражение, описывающее функциональное сечение для каналов 2-го слоя нейрорегулятора, имеет вид зависимости

$$a_j^{(2)} = f_j^{(2)}(S_j^{(2)}),$$

причем

$$\forall j = \overline{1, m}, \quad S_j^{(2)} = \sum_{i=1}^n x_i^{(2)} w_{ij}^{(2)} = \sum_{i=1}^n a_i^{(1)} w_{ij}^{(2)}, \quad (2)$$

где $x_i^{(2)}$ – сигнал в начальной точке 2-го слоя нейронов, всегда равный значению сигнала на выходе i -го канала 1-го слоя $a_i^{(1)}$; $w_{ij}^{(2)}$ – значения весовых коэффициентов при соответствующих порядковым номерам i – x и j – x связях между нейронами во втором слое.

Сигнальная сумма выходного нейрона $S_1^{(3)}$ определяется исходя из выражения:

$$S_1^{(3)} = x_1^{(3)} w_{11}^{(3)} + x_2^{(3)} w_{21}^{(3)} + x_3^{(3)} w_{31}^{(3)} + \dots + x_m^{(3)} w_{m1}^{(3)} = \sum_{j=1}^m x_j^{(3)} w_{j1}^{(3)},$$

что также можно записать как

$$S_1^{(3)} = a_1^{(2)} w_{11}^{(3)} + a_2^{(2)} w_{21}^{(3)} + a_3^{(2)} w_{31}^{(3)} + \dots + a_m^{(2)} w_{m1}^{(3)} = \sum_{j=1}^m a_j^{(2)} w_{j1}^{(3)},$$

поэтому, с учетом функции активации $f_1^{(3)}$, будем иметь следующее функциональное сечение третьего слоя ИНС:

$$\begin{aligned} a^{(3)} &= a_1^{(3)} = f_1^{(3)}(x_1^{(3)} w_{11}^{(3)} + x_2^{(3)} w_{21}^{(3)} + x_3^{(3)} w_{31}^{(3)} + \\ &+ \dots + x_m^{(3)} w_{m1}^{(3)}) = \\ &= f_1^{(3)}(a_1^{(2)} w_{11}^{(3)} + a_2^{(2)} w_{21}^{(3)} + a_3^{(2)} w_{31}^{(3)} + \\ &+ \dots + a_m^{(2)} w_{m1}^{(3)}). \end{aligned} \quad (3)$$

Исходя из выражений (2) и (3), зависимость (1) можно переписать в следующей форме:

$$a^{(p)} = F^{(p)}(S^{(p)}) = F^{(p)}(\mathbf{x}^{(p)}, \mathbf{w}^{(p)}) = F^{(p)}(\mathbf{a}^{(p-1)}, \mathbf{w}^{(p)}),$$

где $\mathbf{x}^{(p)}$ – вектор сигналов в начальных точках p -го слоя ИНС; $\mathbf{w}^{(p)}$ – вектор весовых коэффициентов p -го слоя ИНС.

В нейрорегуляторах подобной структуры могут быть использованы самые разнообразные функции активации $F^{(p)}$, включая линейные, пороговые, сигмоидальные и многие другие. При этом в большинстве случаев во всех трех слоях ИНС используется один и тот же тип функции активации.

Адаптацию рассмотренной структуры нейрорегулятора к различным типам бортовых систем КА можно исследовать также на основе подбора параметров функции отрицательной обратной связи $Z(Q_{кор.})$ и параметра дополнительной корректировки $Q_{кор.}$ в частности.

Структура представленного трехслойного нейрорегулятора первого порядка для решения задач автоматического регулирования в бортовых системах КА может быть реализована как программными средствами бортовой цифровой вычислительной системы (БЦВС), входящими в состав БКУ КА, так и аппаратными. Рассмотрим данные способы более подробно.

Программная эмуляция нейрорегуляторов в БКУ КА

Безусловно, в большинстве случаев наиболее простым и предпочтительным вариантом реализации нейрорегуляторов в бортовых системах КА, будет являться программная эмуляция ИНС нейрорегулятора.

С точки зрения функционального назначения практически любой нейрорегулятор может быть сопоставлен с некоторой контролирующей системой, в задачи которой будет входить формирование корректирующих команд управления и выдача их на

соответствующий объект управления. Поэтому по аналогии с системами контроля и диагностики (СКД) бортовых систем КА, которые в большинстве случаев реализуются программными средствами БЦВС БКУ [6...9], программное приложение, эмулирующее нейрорегулятор со всей его структурой, также может входить в состав служебного либо функционального ПО БКУ КА.

С другой стороны, эмулятор ИНС может быть использован для регулирования измерительно-управляющих команд, формируемых как в служебном, так и в функциональном ПО. Исходя из этих соображений, на рисунке 2 представлена упрощенная блок-схема КА, содержащая в составе ПО БКУ КА независимый по отношению к функциональному и служебному ПО эмулятор ИНС.

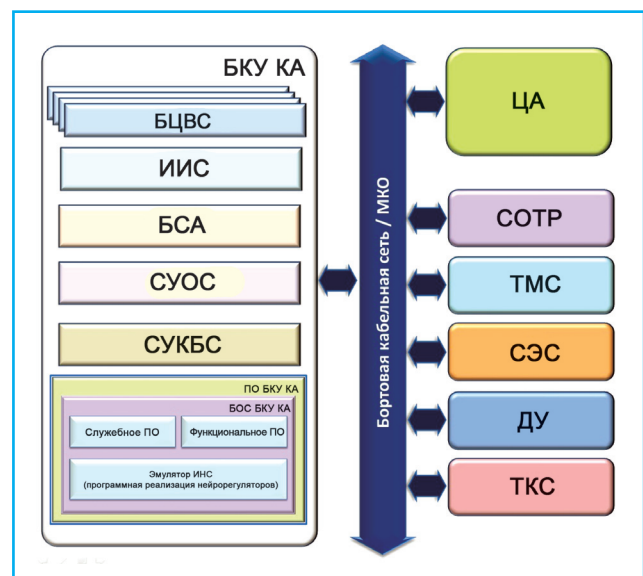


Рис. 2. Программная эмуляция нейрорегуляторов в БКУ КА

В соответствии с типовым составом бортовых систем КА [6...9], в состав БКУ входит резервируемая БЦВС, информационно-измерительная система (ИИС), блок силовой автоматики (БСА), система управления ориентацией и стабилизацией (СУОС), система управления коммутацией бортовых систем (СУКБС) и ПО, относящееся преимущественно к аппаратно-программным средствам БЦВС. Через ИИС осуществляется прием и обработка данных о состоянии КА, которые в виде вектора параметров состояния КА $Z_{КА}$ передаются в БЦВС и учитываются при формировании выходного вектора управляющей информации от БКУ $Y_{БКУ}$, распределяемого через бортовую кабельную сеть мультиплексного канала обмена (МКО) на все смежные бортовые системы КА, включая целевую аппаратуру (ЦА). В рамках рассматриваемого примера к смежным системам относятся: СОТР, обеспечивающая поддержание заданного теплового режима на всех конструктивных и системных участках КА; телеметрическая система (ТМС),

обеспечивающая сбор, первичную обработку и выдачу телеметрических данных в БКУ; СЭС, выполняющая распределение электропитания по всем подсистемам и модулям КА; система управления ДУ, реализующая управление объединенной двигательной установкой; телекомандная система (ТКС), посредством которой осуществляется получение и подтверждение команд от наземного комплекса управления по командной радиолинии космического аппарата.

Предлагаемый способ программной реализации нейрорегулятора заключается в эмуляции ИНС в виде отдельного программного приложения, которое совместно со служебным ПО, функциональным ПО и базовой операционной системой (БОС) будет составлять весь комплекс программных средств, входящих в состав БКУ КА.

Данный способ программной реализации нейрорегуляторов удобен, прежде всего, с точки зрения централизованного подхода к построению нескольких независимых нейрорегуляторов для различных смежных с БКУ бортовых систем КА. Недостатком, безусловно, в данном случае будет общее усложнение программно-алгоритмического обеспечения БКУ КА и необходимость в увеличении общей памяти постоянных запоминающих устройств БЦВС.

Аппаратные способы построения нейрорегуляторов в составе БКУ

Из существующих на сегодняшний день подходов по аппаратной реализации нейрорегуляторов можно выделить два наиболее активно развивающихся:

- 1) реализация нейрорегуляторов на базе ПЛИС класса FPGA;
- 2) реализация нейрорегуляторов на базе специализированных нейропроцессоров (нейрочипов).

Далее коротко рассмотрим некоторые особенности этих подходов.

Реализация нейрорегуляторов на базе ПЛИС FPGA

Говоря о практической реализации нейрорегуляторов на базе ПЛИС класса FPGA, подразумевается, прежде всего, использование некоторых общих концепций построения реконфигурируемых вычислительных систем (РВС), которые сегодня активно развиваются в рамках различного рода спецвычислителей и суперкомпьютеров [10...12]. Многие базовые идеи различных концепций РВС базируются на фундаментальных принципах конвейерности и параллелизма, открытости и масштабируемости однородных вычислительных архитектур, единстве общих принципов описания всех алгоритмов графоаналитическими и комбинаторными методами, которые были заложены еще в начале 60-х годов прошлого века. Именно благодаря ПЛИС, многие из известных концепций РВС сегодня вполне успешно реализованы и продолжают совершенствоваться параллельно с совершенствованием самих ПЛИС [10].

В двух предыдущих работах [13, 14] обсуждались основные проблемные вопросы, связанные с построением нейросетевых архитектур на базе ПЛИС FPGA применительно к бортовым системам КА. Здесь предлагается более обобщенный вариант структурной схемы многоканального нейрорегулятора бортовых систем КА, строящегося на базе единого составного поля ПЛИС FPGA (рис. 3).

На рисунке 3 представлена структура БКУ КА, осуществляющего взаимодействие со смежными системами КА через два мультиплексных канала обмена: МКО-1 и МКО-2. В отличие от

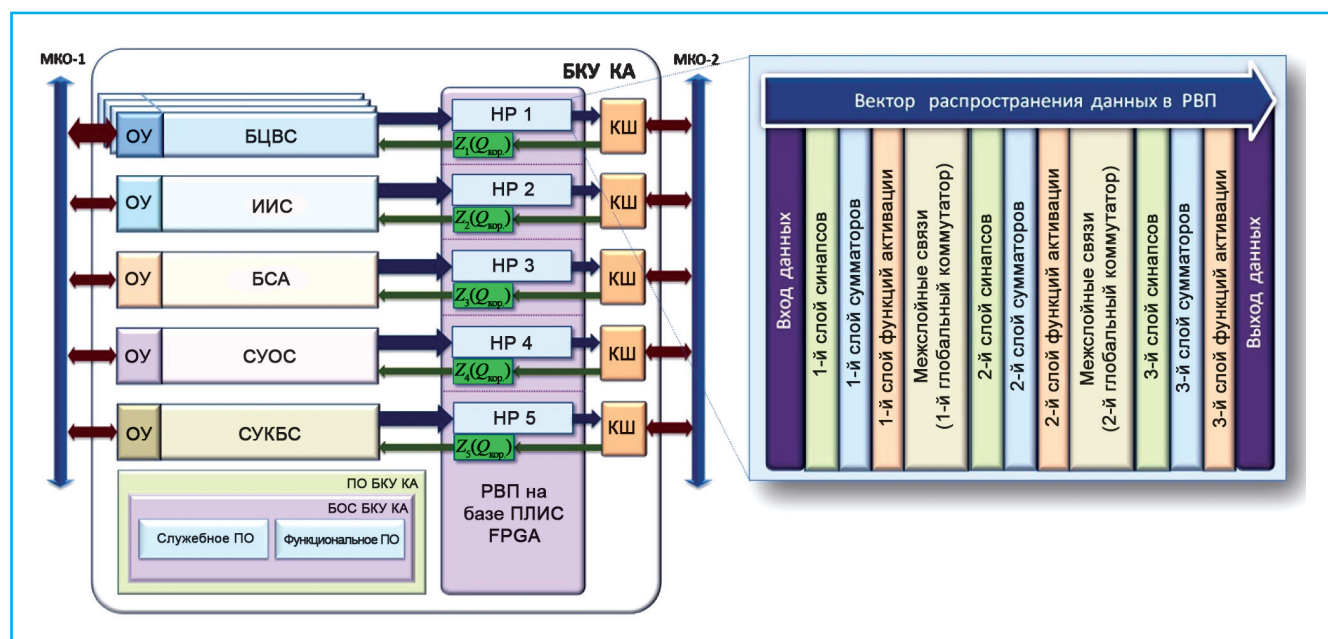


Рис. 3. Многоканальный нейрорегулятор на базе единого РВП

предыдущего (программного) способа реализации нейрорегуляторов, аппаратный способ предполагает введение в состав БКУ дополнительной подсистемы – реконфигурируемого вычислительного поля (РВП). Последнее, в свою очередь, может быть реализовано на базе матричного набора ПЛИС класса FPGA, число которых определяется как требуемыми характеристиками надежности РВП, так и общим вычислительным ресурсом РВП, достаточным для аппаратной реализации многоканального нейрорегулятора. В состав РВП входит набор архитектур из пяти независимых нейрорегуляторов. Взаимодействие каждого из нейрорегуляторов с соответствующей ему смежной системой осуществляется через независимый контроллер шины (КШ) МКО. Кроме того, в предлагаемой структуре БКУ взаимодействие основных подсистем БКУ со смежными подсистемами также может осуществляться и через оконечные устройства (ОУ) по шине МКО-1. Данная особенность предусматривает сохранение работоспособности БКУ при выходе из строя отдельных нейрорегуляторов либо выхода из строя всего РВП.

Справа на рисунке 3 представлен принцип построения каждого из нейрорегуляторов, который на основе ранее рассмотренного примера структуры нейрорегулятора первого порядка представляет собой последовательность соответствующих функциональных архитектур, реализующих ввод данных в ИНС, слой ИНС и вывод данных от ИНС.

В соответствии с работой [15] аппаратную архитектуру любого из функциональных слоев нейрорегулятора можно описать конфигурационной функцией вида

$$K_h^{РВП} = F(\mathbf{L}_h, G(\mathbf{L}_h)), \quad (4)$$

где \mathbf{L}_h – матричный набор конфигурируемых логических блоков (КЛБ), реализующий h -й функциональный слой нейрорегулятора, который, в свою очередь, можно записать как

$$\mathbf{L}_h = \begin{pmatrix} \gamma_{11}L_{11}^{(1)} & \gamma_{12}L_{12}^{(1)} & \cdots & \gamma_{1l}L_{1l}^{(1)} \\ \gamma_{21}L_{21}^{(1)} & \gamma_{22}L_{22}^{(1)} & \cdots & \gamma_{2l}L_{2l}^{(1)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \gamma_{b1}L_{b1}^{(1)} & \gamma_{b2}L_{b2}^{(1)} & \cdots & \gamma_{bl}L_{bl}^{(1)} \end{pmatrix},$$

где $L_{sr}^{(1)}$ – логико-арифметическая функция, реализуемая посредством КЛБ, расположенного в s -ой строке и r -ом столбце матрицы фрагмента РВП \mathbf{L}_h ($s = 1, \bar{b}$, $r = 1, \bar{l}$), соответствующего 1-му функциональному слою ИНС ($p = 1$); γ_{sr} – функция задействования КЛБ в вычислительной операции и принимающая одно из двух значений:

$$\gamma_{sr} = \begin{cases} 1, & \text{если КЛБ } L_{sr}^{(1)} \text{ задействован,} \\ 0, & \text{если КЛБ } L_{sr}^{(1)} \text{ незадействован.} \end{cases}$$

Орграф $G(\mathbf{L}_h)$ описывает топологию направленных логико-арифметических связей между КЛБ-вершинами в матрице \mathbf{L}_h , задавая тем самым строгую аппаратную конфигурацию низкоуровневой архитектуры функционального слоя нейрорегулятора.

Из рисунка 3 также видно, что аппаратная реализация функции отрицательной обратной связи нейрорегулятора $Z(Q_{\text{кор}})$ производится на базе независимого фрагмента РВП, не входящего в состав нейрорегулятора. Архитектура данного фрагмента по аналогии с архитектурой самого нейрорегулятора описывается соответствующей ей конфигурационной функцией вида (4).

Достоинством данного способа является изолированное формирование управляющих данных в РВП по отношению к остальным подсистемам БКУ КА. Недостатком данного решения является общее усложнение аппаратной части БКУ, приводящее в итоге к снижению общей надежности КА в целом.

Реализация нейрорегуляторов на базе специализированных нейропроцессоров

Помимо унифицированной платформы ПЛИС, другим вполне доступным сегодня способом аппаратной реализации нейрорегуляторов в составе бортовых систем КА является использование специализированных нейропроцессоров [16]. В настоящее время существует огромное число нейропроцессоров, способных реализовать не только ИНС, рассмотренные в начале данной статьи, но и ИНС, содержащие более миллиона формальных аппаратных (или аппаратно-программных) нейронов и образующих несколько сотен скрытых слоев в составе одного нейропроцессора. Между тем, применение такого подхода, к примеру в БКУ КА, также потребует введения дополнительной аппаратной подсистемы. Именно поэтому достоинства и недостатки в данном случае будут полностью аналогичны тем, которые присутствуют при реализации нейрорегуляторов на базе ПЛИС.

С другой стороны, построение нейрорегуляторов на базе нейропроцессоров может быть вполне оправдано с практической точки зрения при непосредственном включении последних в аппаратный состав той или иной бортовой системы КА, не относящейся к БКУ. Такой системой может являться, к примеру, СОТР, СЭС и т. д. Именно этот подход, по мнению авторов, является наиболее приемлемым, когда речь заходит об использовании специализированных нейропроцессоров в составе бортовых систем КА.

Общий вывод

Рассмотрены общие вопросы, связанные со способами практической аппаратно-программной реализации нейрорегуляторов в составе бортовых систем КА.

В первой части статьи проведен анализ типичной структуры нейрорегулятора первого порядка, выполненного на базе трехслойного персептрона с одним аппроксимирующим выходом. Во второй части рассмотрены программные и аппаратные способы реализации нейрорегуляторов в составе бортовых систем КА.

Предложен общий принцип программной реализации нейрорегулятора, заключающийся в независимой относительно функционального и служебного ПО эмуляции ИНС в виде отдельного программного приложения. Достоинством данного способа является централизованный подход к построению нескольких независимых нейрорегуляторов для различных смежных с БКУ бортовых систем КА, недостатком – общее усложнение программно-алгоритмического обеспечения БКУ КА.

Предложен общий принцип аппаратной реализации многоканального нейрорегулятора на базе ПЛИС класса FPGA. Достоинством данного способа является изолированное формирование управляющих данных в РВП, недостатком – снижение надежности БКУ и КА в целом.

Таким образом, каждый из рассмотренных способов может быть вполне приемлемым в зависимости от рассматриваемых задач нейрорегулирования в рамках той или иной бортовой системы КА.

Список литературы

- Хайкин С. *Нейронные сети*: полный курс, 2-е издание. Пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. 1104 с.
- Буянкин В.М. Синтез нейрорегуляторов для сложных технологических установок с применением бинарных нечетких отношений // *Исследования наукограда*. 2013, № 1 (3). С. 33–41.
- Буянкин В.М. Интегральный пропорциональный дифференциальный нейрорегулятор // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Естественные науки»*. 2006, № 3. С. 56–61.
- Ефимов В.В. *Нейрокомпьютеры в космической технике*. Кн. 17. М.: Изд-во «Радиотехника», научная серия «Нейрокомпьютеры и их применение». 2004. 320 с.
- Загоруйко С.Н. Разработка адаптивного инверсного нейрорегулятора для системы управления пьезоэлектрическим мехатронным модулем // *Молодежный научно-технический вестник*. 2012, № 8. URL: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/466058.html> (дата обращения: 07.03.2016).
- Бровкин А.Г., Бурдыгов Б.Г., Гордийко С.В. и др. *Бортовые системы управления космическими аппаратами* / Под ред. проф. А.С. Сырова. М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2010. 304 с.
- Микрин Е.А. *Бортовые комплексы управления космическими аппаратами и проектирование их программного обеспечения*. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. 336 с.
- Микрин Е.А. *Бортовые комплексы управления космическими аппаратами*: учебное пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 245 с.
- Умнов А.А. *Проектирование бортовых комплексов управления*: текст лекций. СПб.: СПб ГУАП. 2000. 59 с.
- Каляев И.А., Левин И.И., Семерников Е.А., Шмойлов В.И. *Реконфигурируемые мультимедийные вычислительные структуры* / Изд. 2-е, перераб. и доп. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2009. 344 с.
- Hauck S. *Reconfigurable computing. The theory and practice of FPGA-based computation*. Morgan Kaufmann Publ., 2007. 944 p.
- Gokhale M., Graham P.S. *Reconfigurable Computing-Accelerating Computation with Field-Programmable Gate Arrays*. Springer Publ., 2005. 238 p.
- Савкин Л.В., Дмитриев В.Г., Федоров Е.А. *Нейронные сети на базе программируемых логических интегральных схем в бортовой аппаратуре КА / XL Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых – пионеров освоения космического пространства*: сборник тезисов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. 202 с.
- Савкин Л.В., Дмитриев В.Г. *О двух перспективных нейросетевых подходах к построению интеллектуальных бортовых измерительно-вычислительных и управляющих комплексов современных космических аппаратов / Сборник научных трудов XIII Молодежной научно-технической конференции «Радиолокация и связь – перспективные технологии» (3 декабря 2015 г.)*. М.: Изд-во: ПАО «Радиофизика». 2015. С. 23–26.
- Савкин Л.В., Ширшаков А.Е., Новичков В.М. О графах больших размерностей относительно выделенного участка, возникающих при формировании диагностических моделей в реконфигурируемом вычислительном поле системы функционального контроля и диагностики бортового комплекса управления космического аппарата // *Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана*. 2015, № 03. С. 85–101. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/759301.html> (дата обращения: 07.03.2016).
- Логовский А.С. Технология ПЛИС и ее применение для создания нейрочипов // *Открытые системы*. 2000, № 10. URL: <http://www.osp.ru/os/2000/10/178242/> (дата обращения: 07.03.2016).

References

- Khaykin S. *Neuronnyye seti: polnyy kurs, 2-e izdanie*. Per. s angl. [Neural networks: full course, 2nd edition]. M.: Izdatelskiy dom «Vilyams» [Moscow: Publishing house «Williams»]. 2006. 1104 p.
- Buyankin V.M. *Sintez neyroregulyatorov dlya slozhnykh tekhnologicheskikh ustanovok s primeneniem binarnykh nechetskikh otnosheniy* [Synthesis

- neuroregulators for difficult technological installations with application of the binary indistinct relations]. *Issledovaniya naukograda* [Researches of the science city]. 2013, no. 1 (3), pp. 33–41.
3. Buyankin V.M. Integralnyy proporsionalnyy differentsialnyy neyroregulyator [Integrated proportional differential neuroregulator]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Seriya «Yestestvennye nauki»* [Bulletin of Moscow State Technical University named after N.E. Bauman. «Science» series]. 2006, no. 3, pp. 56–61.
 4. Yefimov V.V. *Neyrokompyutery v kosmicheskoy tekhnike*. Kn. 17 [Neurocomputers in space technology. Bk. 17]. M.: Izd-vo «Radiotekhnika», nauchnaya seriya «Neyrokompyutery i ikh primenenie» [Moscow: Publishing house «Radiotec», Scientific series «Neurocomputers and their application»]. 2004. 320 p.
 5. Zagoruyko S.N. Razrabotka adaptivnogo inversnogo neyroregulyatora dlya sistemy upravleniya pezoelektricheskim mekhatronnym modulem [Development of adaptive inverse neuroregulator for a control system of the piezoelectric mekhatronny module]. *Molodezhnyy nauchno-tekhnicheskiiy vestnik* [The Youth scientific and technical messenger]. 2012, no. 8 URL: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/466058.html> (date of the address: 07.03.2016).
 6. Brovkin A.G., Burdygov B.G., Gordiyko S.V. i dr. *Bortovye sistemy upravleniya kosmicheskimi apparatami* / Pod red. prof. A.S. Syrova [The Spacecrafts Onboard Control Systems]. M.: Izd-vo MAI-PRINT [Moscow: Publishing House of the MAI-PRINT]. 2010. 304 p.
 7. Mikrin Ye.A. *Bortovye komplekсы upravleniya kosmicheskimi apparatami i proektirovanie ikh programmnogo obespecheniya* [Spacecraft's onboard control complexes and design of their software]. M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana [Moscow: Publisher Moscow State Technical University named after N.E. Bauman]. 2003. 336 p.
 8. Mikrin Ye.A. *Bortovye komplekсы upravleniya kosmicheskimi apparatami: uchebnoe posobie* [Spacecraft's onboard control complexes]. M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana [Moscow: Publisher Moscow State Technical University named after N.E. Bauman]. 2014. 245 p.
 9. Umnov A.A. *Proektirovanie bortovykh kompleksov upravleniya: tekst lektsiy* [Design of onboard control complexes: Text of lectures]. SPb.: SPb GUAP [St. Petersburg: Publisher St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation]. 2000. 59 p.
 10. Kalyaev I.A., Levin I.I., Semernikov Ye.A., Shmoylov V.I. *Rekonfiguriruemye multikonveyernye vychislitelnye struktury* / Izd. 2-e, pererab. i dop. [Reconfigurable multipipeline computing structures. Ed. 2nd, Revised. and ext.]. Rostov-na-Donu: Izd-vo YuNTs RAN [Rostov-on-Don: Publisher of the Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]. 2009. 344 p.
 11. Hauck S. Reconfigurable computing. The theory and practice of FPGA-based computation. Morgan Kaufmann Publ., 2007. 944 p.
 12. Gokhale M., Graham P.S. Reconfigurable Computing—Accelerating Computation with Field-Programmable Gate Arrays. Springer Publ., 2005. 238 p.
 13. Savkin L.V., Dmitriev V.G., Fedorov Ye.A. *Neyronnye seti na baze programmiruemykh logicheskikh integralnykh skhem v bortovoy apparature KA / XL Akademicheskie chteniya po kosmonavtike, posvyashchennye pamyati akademika S.P. Koroleva i drugikh vydayushchikhsya otechestvennykh uchenykh – pionerov osvoeniya kosmicheskogo prostranstva: sbornik tezisev* [Neural networks on the basis of programmable logical integrated circuits in the spacecraft onboard equipment / XL Academic readings on astronautics devoted to memory of academician S.P. Korolev and other outstanding domestic scientists – pioneers of space development]. M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana [Moscow: Publisher Moscow State Technical University named after N.E. Bauman], 2015. 202 p.
 14. Savkin L.V., Dmitriev V.G. *O dvukh perspektivnykh neyrosetevykh podkhodakh k postroeniyu intellektualnykh bortovykh izmeritelno-vychislitelnykh i upravlyayushchikh kompleksov sovremennykh kosmicheskikh apparatov / Sbornik nauchnykh trudov XIII Molodezhnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Radiolokatsiya i svyaz – perspektivnye tekhnologii» (3 dekabrya 2015 g.)* [About two perspective neural network approaches for creation modern spacecrafts intelligent onboard measuring computing and operating complexes / Collection of scientific works XIII Youth scientific and technical conference «Radarlocation and Communication – Perspective Technologies» (on December 3, 2015)]. M.: Izd-vo: PAO «Radiofizika» [Moscow: Publisher Public Joint Stock Company «Radiophysics»]. 2015, pp. 23–26.
 15. Savkin L.V., Shirshakov A.Ye., Novichkov V.M. O grafakh bolshikh razmernostey otnositelno vydelennogo uchastka, vznikayushchikh pri formirovaniy diagnosticheskikh modeley v rekonfiguriruemom vychislitelnom pole sistemy funktsionalnogo kontrolya i diagnostiki bortovogo kompleksa upravleniya kosmicheskogo apparata [About the big graphs dimensionalities of rather selected section arising when forming diagnostic models in a reconfigurable computing field of spacecraft onboard control complex functional monitoring and diagnostics system]. *Nauka i obrazovanie. MGTU im. N.E. Baumana* [Science and education. MGTU of N.E. Bauman]. 2015, no. 03, pp. 85–101. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/759301.html> (date of the address: 07.03.2016).
 16. Logovskiy A.S. Tekhnologiya PLIS i ee primenenie dlya sozdaniya neyrochipov [The FPGA technology and its application for creation neurochips]. *Otkrytye sistemy* [Open systems]. 2000, no. 10. URL: <http://www.osp.ru/os/2000/10/178242/> (date of the address: 07.03.2016).

Информация об авторах

Савкин Леонид Васильевич, соискатель, специалист
1-й категории Научно-исследовательского отдела № 1
E-mail: leonid.itmo@mail.ru

Публичное акционерное общество «Радиофизика»
125363, Российская Федерация, г. Москва, ул. Героев-
Панфиловцев, д. 10

Дмитриев Виктор Геннадьевич, инженер-схемотех-
ник бюро радиоэлектронной техники
E-mail: victor116@yandex.ru

Федоров Евгений Анатольевич, аспирант, инженер-
программист технического отдела
E-mail: grumenel@gmail.com

Федеральное государственное унитарное предприятие
«Научно-производственное объединение им. С.А. Ла-
вочкина»

141400, Российская Федерация, г. Химки, ул. Ленинг-
радская, д. 24

Филатов Владимир Иванович, кандидат технических
наук, старший научный сотрудник лаборатории
E-mail: vfil10@mail.com

Военная академия ракетных войск стратегического
назначения им. Петра Великого

109074, Российская Федерация, г. Москва, Китайгород-
ский пр-д, д. 9

Гусенков Павел Алексеевич, студент 5 курса

E-mail: pavel_sv@list.ru

Московский физико-технический институт (государ-
ственный университет)

141700, Российская Федерация, г. Долгопрудный, Инс-
титутский пер., д. 9

Information about the authors

Savkin Leonid Vasilyevich, Competitor, Expert 1st Cat-
egory of Research Department №1

E-mail: leonid.itmo@mail.ru

Public Joint Stock Company «Radiofizika»
125363, Russian Federation, Moscow, Geroyev-Panfilov-
tsev Str., 10

Dmitriyev Victor Gennadevich, Circuit Design Engineer
of Radioelectronic Equipment Bureau

E-mail: victor116@yandex.ru

Fedorov Evgeny Anatolyevich, Postgraduate Student,
Software Engineer of Technical Department

E-mail: grumenel@gmail.com

Federal Enterprise «Lavochkin Association»

141400, Russian Federation, Khimki, Leningrad-
skaya Str., 24

Filatov Vladimir Ivanovich, Candidate of Technical
Sciences, Senior Research Associate of Laboratory

E-mail: vfil10@mail.com

Military Academy of Strategic Rocket Forces

109074, Russian Federation, Moscow, Kitaigorodsky
Drive, 9

Gusenkov Pavel Alekseevich, Student of the 5th Course

E-mail: pavel_sv@list.ru

Moscow Institute of Physics and Technology (State Uni-
versity)

141700, Russian Federation, Dolgoprudny, Institutsky
Lane, 9