

СНИЖЕНИЕ АППАРАТУРНЫХ ЗАТРАТ МЕСТНОГО ФРАГМЕНТАРНОГО УСТРОЙСТВА УПРАВЛЕНИЯ В НЕЙРОСЕТЕВОМ АНАЛОГО-ЦИФРОВОМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ

А. А. Наборщиков, А. И. Посягин*, Е. Д. Путин, А. А. Южаков

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

** posyagin.anton@gmail.com*

Аннотация. Рассматривается самомаршрутизирующийся аналого-цифровой преобразователь на основе однослойной нейронной сети, состоящей из основных измерительных нейронов. Для основного измерительного нейрона представлена система управления, реализующая самомаршрутизацию сигналов в нейронной сети методом „эхолокации“ при формировании индивидуального измерителя требуемой разрядности. Предложен способ уменьшения аппаратных затрат на реализацию системы управления за счет использования местного фрагментарного устройства управления, элементы которого распределены между нейронами и могут объединяться для управления работой аналого-цифрового преобразователя. Разработаны функциональные схемы местного фрагментарного устройства управления с разделением счетчиков, используемых при „эхолокации“, на основании которых в среде Quartus построены модели, с помощью последних оценены аппаратные затраты, измеряемые в числе используемых логических блоков LUT и регистров. Компиляция проекта для программируемой логической интегральной схемы показала уменьшение аппаратных затрат на 20–25 % (в зависимости от параметров нейронной сети), по сравнению с использованием устройства управления без разделения счетчиков. Следует отметить, что местное фрагментарное устройство управления позволяет упростить масштабирование сети и увеличить ее отказоустойчивость.

Ключевые слова: аналого-цифровой преобразователь, самомаршрутизация, нейронная сеть, метод „эхолокации“, местное фрагментарное устройство управления

Ссылка для цитирования: Наборщиков А. А., Посягин А. И., Путин Е. Д., Южаков А. А. Снижение аппаратных затрат местного фрагментарного устройства управления в нейросетевом аналого-цифровом преобразователе // Изв. вузов. Приборостроение. 2025. Т. 68, № 6. С. 500–510. DOI: 10.17586/0021-3454-2025-68-6-500-510.

REDUCING HARDWARE COSTS OF A LOCAL FRAGMENTED CONTROL DEVICE IN A NEURAL NETWORK ANALOG-TO-DIGITAL CONVERTER

A. A. Naborshikov, A. I. Posyagin*, E. D. Putin, A. A. Yuzhakov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

** posyagin.anton@gmail.com*

Abstract. A self-routing analog-to-digital converter based on a single-layer neural network consisting of basic measuring neurons is considered. For the main measuring neuron, a control system is presented that implements self-routing of signals in a neural network using the “echolocation” method when forming an individual meter of the required bit depth. A method is proposed to reduce the hardware costs of implementing a control system by using a local fragmented control device, the elements of which are distributed among neurons and can be combined to control the operation of an analog-to-digital converter. Functional schemes of a local fragmentary control device with separation of counters used in “echolocation” have been developed, on the basis of which models have been built in the Quartus environment, using the latter to estimate hardware costs measured in the number of LUT logic blocks and registers used. The compilation of the project for a programmable logic integrated circuit showed a 20-25% reduction in hardware costs (depending on the parameters of the neural network), compared with using a control device without separating counters. It should be noted that the local fragmented management device makes it easier to scale the network and increase its fault tolerance.

Keywords: analog-to-digital converter, self-routing, neural network, “echo-location” method, local fragmented control device

For citation: Naborshikov A. A., Posyagin A. I., Putin E. D., Yuzhakov A. A. Reducing hardware costs of a local fragmented control device in a neural network analog-to-digital converter. *Journal of Instrument Engineering*. 2025. Vol. 68, N 6. P. 500–510 (in Russian). DOI:10.17586/0021-3454-2025-68-6-500-510.

Введение. Современные системы управления (СУ) преимущественно строятся на основе применения микропроцессоров или микроконтроллеров для принятия решений и регулирования объекта управления (ОУ) [1]. Поэтому с целью получения в СУ информации о текущем состоянии ОУ необходимо организовать связи между ними. Для этого применяют различные датчики (первичные преобразователи), которые позволяют измерять параметры, необходимые для управления объектом, затем эти данные, как правило, преобразуются в различные электрические параметры, такие как напряжение, сила или частота тока [2]. Такие данные поступают непрерывно и в виде аналогового сигнала, который может принимать любые значения в заданном диапазоне, и его необходимо преобразовать в цифровой двоичный код для использования в микроконтроллере [3].

Достаточно мощные и универсальные микроконтроллеры при этом могут иметь встроенные аналого-цифровые преобразователи (АЦП), позволяющие не использовать отдельный блок в СУ. Но такое решение подходит, в первую очередь, для небольших систем, где данные об ОУ ограничены небольшим числом сигналов датчиков — как правило, 5–10 [4]. При увеличении количества измеряемых параметров ОУ уменьшаются возможности применения встроенных АЦП и возрастает нагрузка на микроконтроллер, который тратит вычислительные ресурсы на аналого-цифровое преобразование [5]. С другой стороны, можно использовать датчики, включающие в себя АЦП, чтобы передавать в СУ уже преобразованный двоичный сигнал [6]. Но такой подход имеет свои недостатки. Во-первых, условия, в которых находится датчик, также будут воздействовать на АЦП, что может привести к искажению преобразованного сигнала, а во-вторых, добавление АЦП в датчик увеличивает его массогабаритные характеристики и стоимость, что в некоторых случаях может быть критичным [7, 8].

Для особо сложных ОУ, например, манипуляторов на высокоточном производстве, миниатюрных квадрокоптеров, систем навигации и автопилотирования, систем на подвижных объектах или искусственных спутниках, а также для любых других необслуживаемых объектов предлагается использовать АЦП как отдельное устройство между ансамблем датчиков и СУ [9–11]. При этом сформулированы следующие требования по обработке входных сигналов для такого устройства [12]:

- многоканальность — АЦП должен измерять большое число входных сигналов, поступающих в произвольные моменты времени;
- высокая скорость обработки, в том числе за счет одновременного (параллельного) измерения сигналов;
- адаптивность — АЦП должен иметь возможность изменять разрядность проводимого преобразования в зависимости от скорости изменения конкретного поступающего сигнала;
- надежность — АЦП должен гарантировать достоверность выходного сигнала с заданной вероятностью на протяжении длительного периода эксплуатации.

Выполнение представленных требований для АЦП связано с рядом сложностей, которые можно решить с применением специализированных интегральных схем и аппаратурно реализованной искусственной нейронной сетью [13–15].

Самомаршрутизирующийся аналого-цифровой преобразователь на основе однослойной нейронной сети. Одним из возможных вариантов построения такого рода устройств является самомаршрутизирующийся АЦП на основе нейронной сети [16], который обеспечивает выполнение перечисленных выше требований (при этом в зависимости от конкретных параметров СУ снижаются аппаратные затраты на его использование).

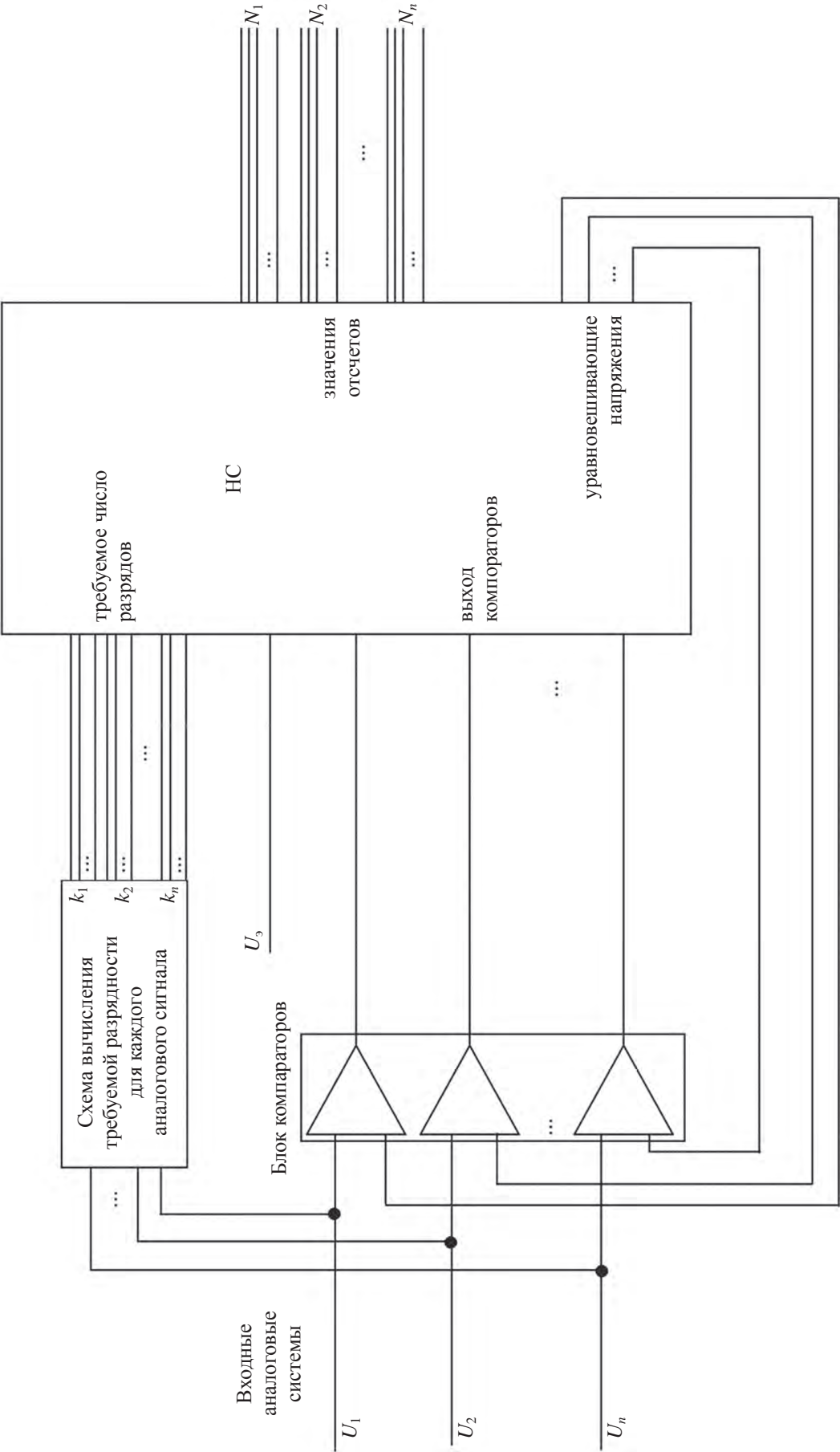


Рис. 1

Такой АЦП представлен на рис. 1 (U_i — входные аналоговые напряжения; k_i — необходимое для обработки i -го входного сигнала число разрядов АЦП; N_i — значение отсчета, полученного в АЦП для i -го входного сигнала, U_0 — постоянное напряжение, используемое АЦП для определения весовых коэффициентов разрядов, НС — нейронная сеть, состоящая из основных измерительных нейронов) [16], который обеспечивает выполнение перечисленных выше требований (при этом в зависимости от конкретных параметров СУ снижаются аппаратные затраты на его использование). Для преобразования в нем применяется метод поразрядного взвешивания с использованием матрицы R-2R, которая представляет собой основу нейронной сети [16, 17]. Нейронная сеть построена таким образом, что матрица R-2R входит в состав аппаратной реализации нейрона отдельными звеньями, образуя один разряд для измерения — основной измерительный нейрон (ОИН). При этом каждый ОИН не является полноценным преобразователем, так как не способен выдать результат без объединения с другими ОИН. В зависимости от параметров входных сигналов в АЦП существует минимальная разрядность проводимого преобразования, которая определяет наименьшее необходимое количество ОИН, объединенных в индивидуальный аналого-цифровой преобразователь (ИАЦП) для конкретного входного сигнала, чтобы такой ИАЦП мог сформировать значение отсчета [17].

Нейронная сеть в рассматриваемом самомаршрутизирующемся АЦП является однослойной, при этом внутри скрытого слоя ОИН связаны между собой в мультикольцо [17], в котором могут быть предусмотрены дополнительные связи между ними, позволяющие сохранять целостность кольца при отказе отдельных нейронов. На рис. 2 приведен пример однослойной НС с одним входным и выходным нейронами и шестью ОИН в скрытом слое, с одной дополнительной связью между ними (тонкими линиями обозначены связи между ОИН и входными/выходными нейронами, полужирными — основные связи между ОИН, пунктиром — дополнительные связи между ОИН). Такой подход обеспечивает простоту масштабирования сети и повышение отказоустойчивости за счет увеличения дополнительных связей между ОИН [17]. Одним из основных достоинств однослойной НС является возможность сохранять ее работоспособность даже в случае возникновения отказов в некотором количестве ОИН, так как сеть будет формировать новые ИАЦП, игнорируя отказавшие и используя только исправные ОИН [16–19].

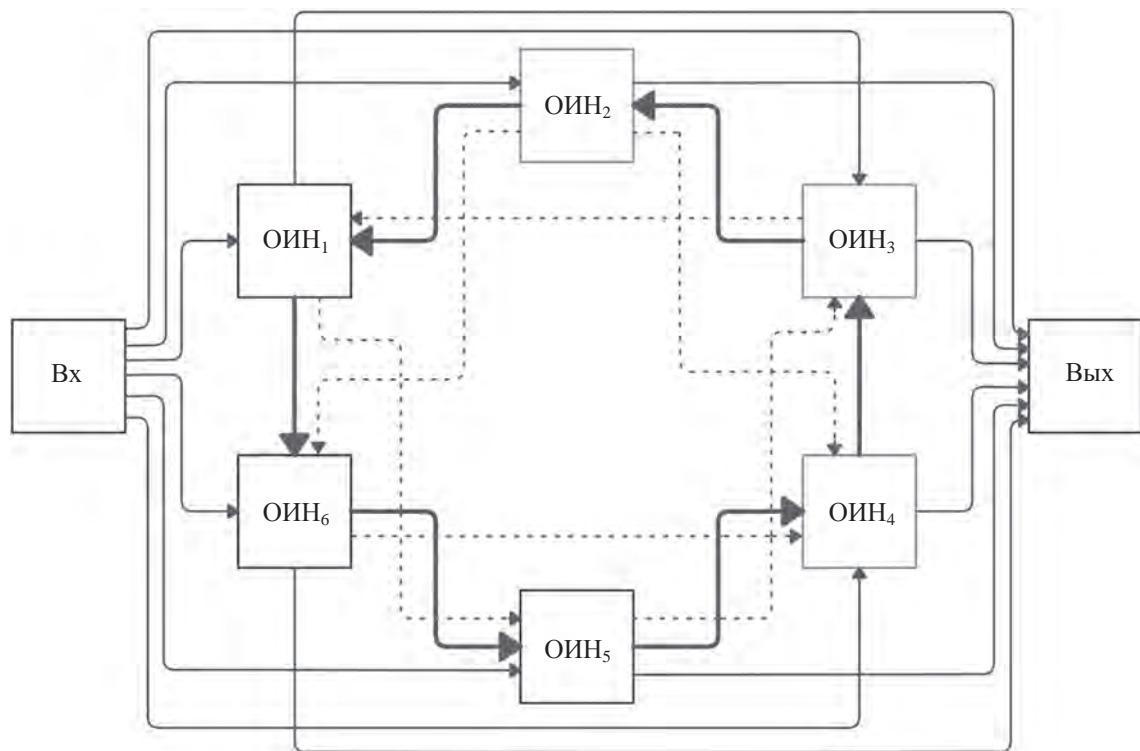


Рис. 2

Для выявления состояния сети применяется метод „эхолокации“ [17], который подразумевает наличие у каждого из ОИН возможности опрашивать соседние нейроны с целью определения количества доступных свободных и исправных ОИН при формировании ИАЦП. В зависимости от состояния сети такой опрос проводят в первую очередь нейроны, расположенные после разрыва кольца, например, после отказа одного из ОИН, или после размещения на каком-то участке ИАЦП. Таким образом, поступающая в НС заявка на формирование ИАЦП по одному из входных нейронов занимает наиболее подходящий участок сети [18].

Для реализации метода „эхолокации“ в каждом ОИН необходимо предусмотреть систему управления сигналами самомаршрутизации, которая включает в себя следующие основные структурные блоки (рис. 3): генератор эхо-запроса, генератор эхо-ответа, счетчик эхо-ответов, декрементирующий счетчик приоритета, определитель состояния, управление формированием ИАЦП. Работа системы самомаршрутизации состоит из трех основных этапов: определение состояния НС путем подсчета свободных нейронов в сети, формирование ИАЦП при поступлении от входного нейрона соответствующей заявки, освобождение нейронов после завершения измерения.

Первый этап начинается с того, что в некоторый случайный момент времени, который зависит от окружающих ОИН и срабатывания определителя состояния, нейрон переходит в состояние генерации эхо-запроса, когда за счет генератора эхо-запроса последующему ОИН передается последовательность логических „1“, соответствующая максимальной разрядности преобразования. Если нейрон не является источником запроса, то за счет этого же блока поступающая от предыдущего ОИН последовательность сокращается на одну единицу. При этом генератор эхо-ответа отправляет сигнал „1“ предыдущему ОИН, если данный нейрон исправен и доступен для формирования ИАЦП, а также передает сигнал эхо-ответов, приходящий от последующих ОИН. Счетчик эхо-ответов нейрона, который изначально отправил эхо-запрос, собирает передаваемые ему „1“ от всех последующих ОИН и работает, по существу, как инкрементирующий счетчик с ограничением по переполнению. Кроме того, необходимо учесть, что реализация метода „эхолокации“ требует определенного времени, следовательно, информация достаточно быстро устаревает, поэтому, как только прекращают поступать эхо-ответы, нейрон запускает новый цикл генерации эхо-запроса.

Таким образом, процесс определения состояния сети практически не прерывается поступлением в АЦП входного сигнала, требующего измерения. В этом случае с входного нейрона на все ОИН поступает заявка с количеством требуемых разрядов для измерения. В тех нейронах, где в этот момент времени ведется подсчет эхо-ответов, эта заявка попадет на декрементирующий счетчик приоритета, где из числа доступных нейронов, взятого из счетчика эхо-ответов, вычитается число требуемых для измерения, а затем остаток декрементируется. Это необходимо для более плотного распределения заявок в сети, так как заявку примет тот ОИН, значение счетчика в котором в первую очередь достигнет нуля. После этого нейрон, забравший заявку, перейдет на этап формирования ИАЦП, для этого опять будет задействован блок эхо-запроса, который сгенерирует последовательность „1“ длительностью, соответствующей числу разрядов, требуемых для ИАЦП. Передавая эту последовательность следующему ОИН совместно со служебным флагом занятости, нейрон начнет формирование ИАЦП заданной разрядности, а каждый последующий ОИН будет уменьшать запрос на единицу и передавать далее, как и в случае эхо-запроса. Последний ОИН, который получит последовательность длиной в единицу, прекратит передачу и подключит свои выходы к выходному нейрону, выставив служебный флаг младшего значащего разряда (МЗР), что завершит процесс формирования ИАЦП.

Наиболее простым является этап освобождения ОИН, когда после проведения измерения из выходного нейрона поступает сигнал на разрушение ИАЦП и все нейроны сбрасывают флаги занятости и переходят опять на этап определения состояния сети, генерируя эхо-запросы и эхо-ответы.

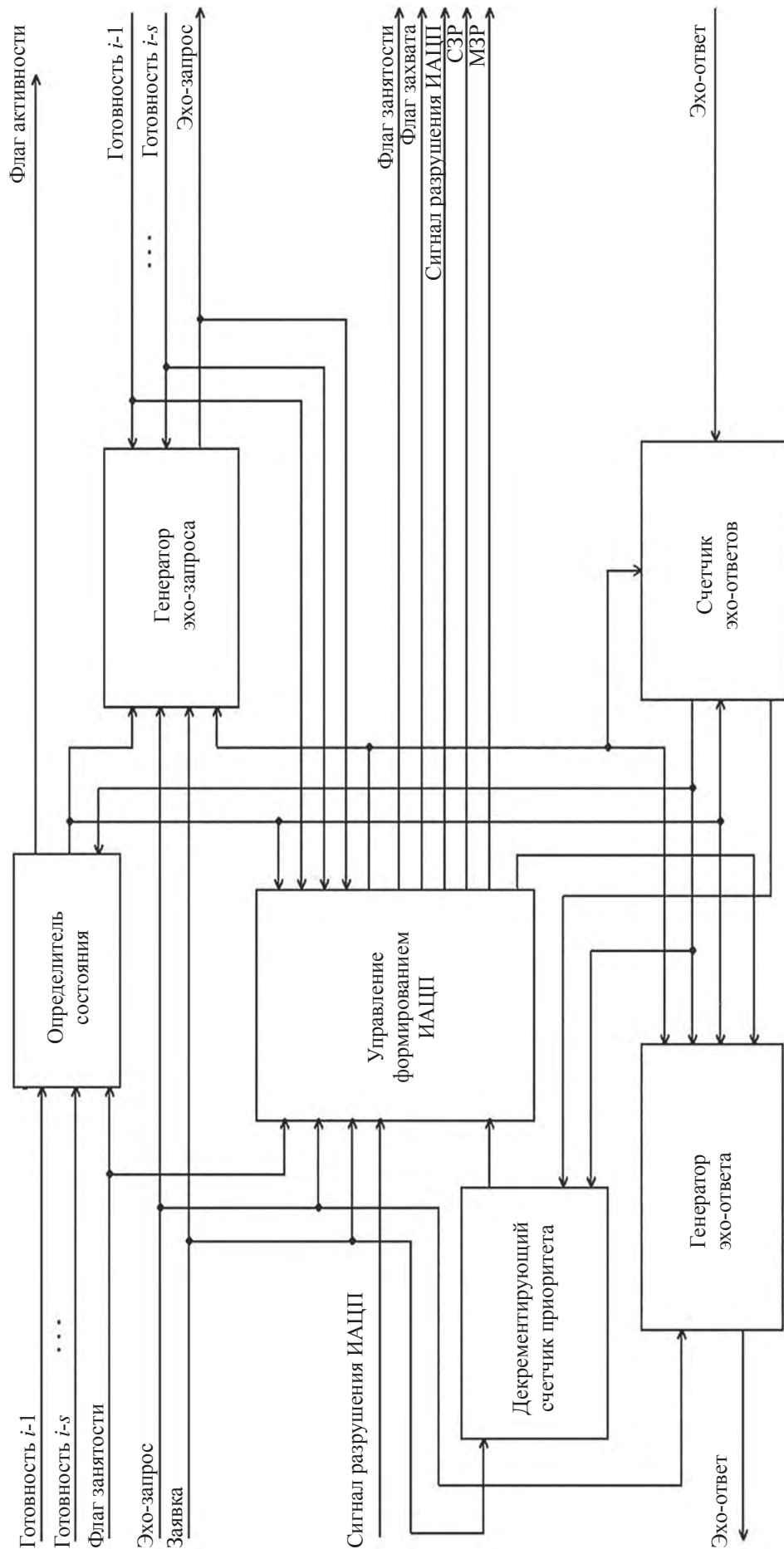


Рис. 3

Местное фрагментарное устройство управления ОИН. Блок управления определяет корректный порядок срабатывания остальных блоков, а также генерирует основные флаги для подключения измерительной части ОИН: флаг занятости, указывающий на то, что нейрон включен в ИАЦП, СЗР (старший значащий разряд) — выход матрицы R-2R подключается к компаратору, МЗР — выход матрицы R-2R подключается к уравнивающему сопротивлению [19].

Реализация и анализ данной структуры блока управления ОИН привели к следующим выводам:

- аппаратные затраты блока управления формированием ИАЦП в 10 раз превышают затраты блока управления измерительной частью;
- наличие вспомогательных блоков генераторов и счетчиков приводит к увеличению общих затрат еще в 15–20 раз, в зависимости от разрядности ИАЦП;
- изменение диапазона разрядностей ИАЦП, требующее увеличения разрядности счетчиков, приводит к необходимости полностью перестраивать функциональные и принципиальные схемы ОИН;
- передача заявки от входного нейрона к ОИН параллельным кодом увеличивает на порядок аппаратные затраты на реализацию ключей как во входном нейроне, так и в ОИН, а также снижает отказоустойчивость.

Для устранения выявленных недостатков в системе управления формированием ИАЦП предлагается устранить дублирование счетчиков и генераторов в каждом ОИН, используя местное фрагментарное устройство управления (МФУУ), когда каждый ОИН содержит только один триггер счетчика/генератора, а их объединение происходит по аналогии с тем, как формируется система управления измерительной частью ИАЦП [19]. К сожалению, для реализации такого подхода необходимо добавить дополнительный генератор метки счета, который позволит определять границы счетчиков и объединять требуемое количество триггеров. Аппаратурные затраты на генератор метки счета ограничены количеством объединяемых триггеров для счетчиков в других блоках, что на порядок уменьшает необходимые аппаратные затраты на каждый блок со счетчиком (генератор эхо-запроса, генератор эхо-ответа, счетчик эхо-ответов, декрементирующий счетчик приоритета).

Для примера приведем функциональную схему генератора эхо-запроса, которая содержит декрементирующий счетчик, позволяющий выдавать на выход схемы количество логических „1“, соответствующее начальной установке счетчика (рис. 4, а). Таким образом, схема при поступлении сигнала уставки переводит триггеры, из которых состоит счетчик, в заданное на входах SET состояние. После этого каждый такт уменьшает значение счетчика, а на выходе ЕСНО формируется сигнал логической единицы. Представленная схема состоит из трех составных частей (пунктир на рис. 4, а): схема, задающая начальное состояние; сам счетчик на четырех D-триггерах (для случая, когда максимальная разрядность ИАЦП не превышает 15); схема, ограничивающая переполнение счетчика и формирующая выходной сигнал. Главным недостатком в таком случае является то, что счетчики размещены в каждом из ОИН для обеспечения возможности каждого ОИН быть СЗР, но при этом во время каждого измерения задействован только один — в СЗР. С целью уменьшения количества аппаратуры, дублированной в каждом ОИН, предложена схема МФУУ для блока эхо-запроса (рис. 4, б). В разработанной схеме в каждом ОИН представлен только один D-триггер из счетчика, но при этом усложняется схема формирования выходного сигнала, так как она отвечает в таком случае за объединение триггеров в общий счетчик. Схема задания начального состояния сокращается, потому как обеспечивает установку лишь одного триггера. Анализ аппаратных затрат показал, что снижение количества транзисторов на реализацию такого решения сокращает затраты на блок эхо-запроса почти вдвое.

Для оценки общего снижения аппаратных затрат на реализацию МФУУ при формировании ИАЦП была построена функциональная модель в среде моделирования Quartus. В условиях моделирования среда компилирует проект, реализованный на языке VHDL, для прошивки

программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС) фирмы Altera, поэтому в качестве критерия оценки было использовано число блоков LUT и количество регистров, которые должны быть использованы ОИН в ПЛИС. После моделирования обоих вариантов системы управления было отмечено сокращение количества блоков LUT, которое показывает снижение числа триггеров, используемых в ПЛИС для реализации схемы управления, а также уменьшение количества регистров, которые при компиляции проекта используются в качестве счетчиков. При этом было проанализировано влияние параметров АЦП на относительное изменение количества LUT и регистров, таких как: минимальная и максимальная разрядность ИАЦП, число входных сигналов для измерения, число дополнительных связей в сети для исключения отказавших ОИН. В частности, модель наиболее ярко иллюстрирует эффективность применения МФУУ и зависимость аппаратных затрат от количества дополнительных связей между ОИН. На рис. 5 приведена зависимость аппаратных затрат на реализацию блока управления в ОИН от числа дополнительных связей n между ОИН в скрытом слое: a — количество блоков LUT в ПЛИС для одного ОИН m_{LUT} , b — количество регистров в ПЛИС для одного ОИН m_r .

Кроме того, дополнительный положительный эффект наблюдается в том, что появляется возможность передавать заявку на формирование ИАЦП от входного нейрона в параллельном коде не в активный ОИН (СЗР), используя для этого 3–5 линий, а по одной линии каждому ОИН, между которыми распределен счетчик. Это позволяет сократить число связующих линий между входными нейронами и ОИН, сохраняя высокую скорость передачи.

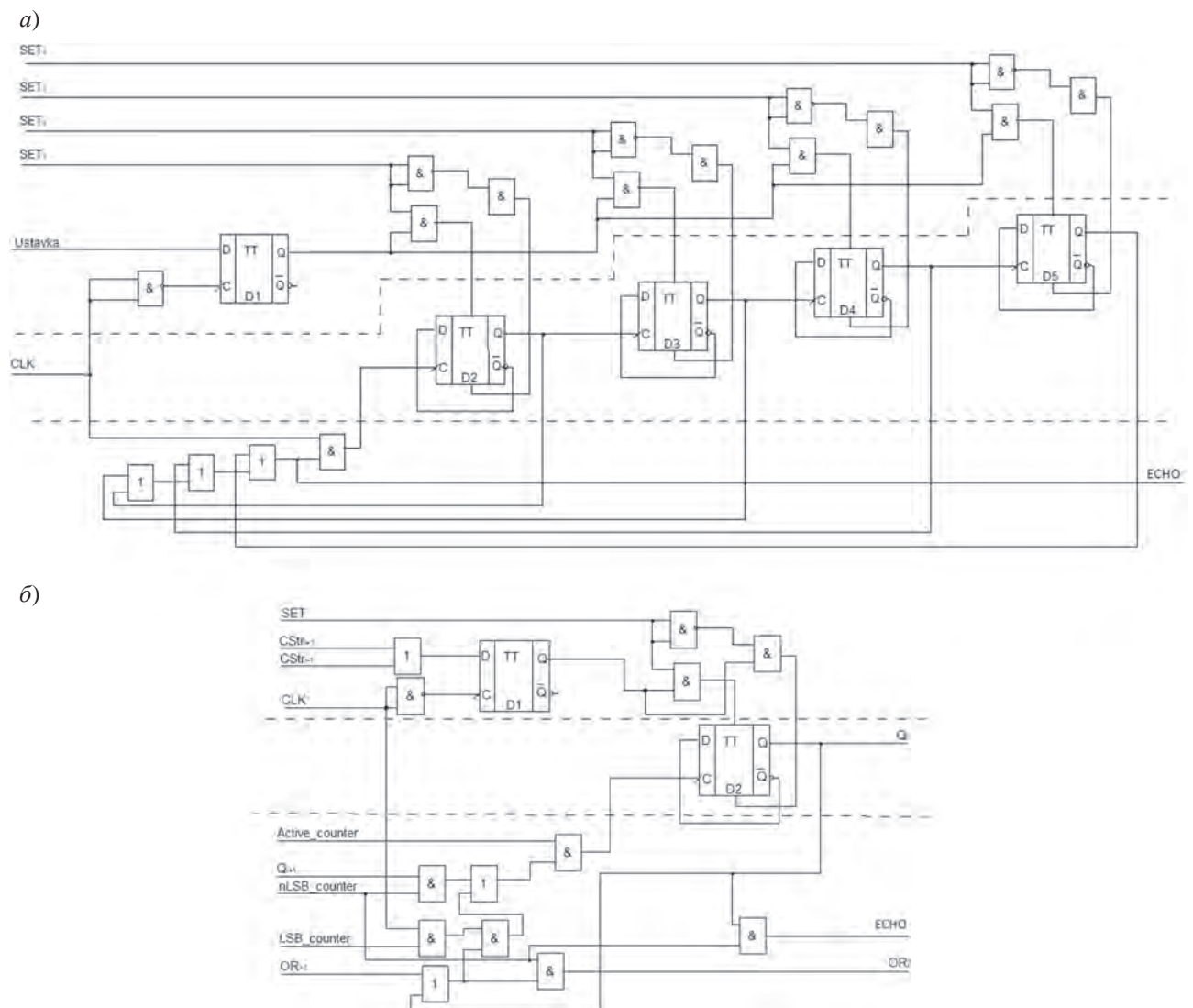


Рис. 4

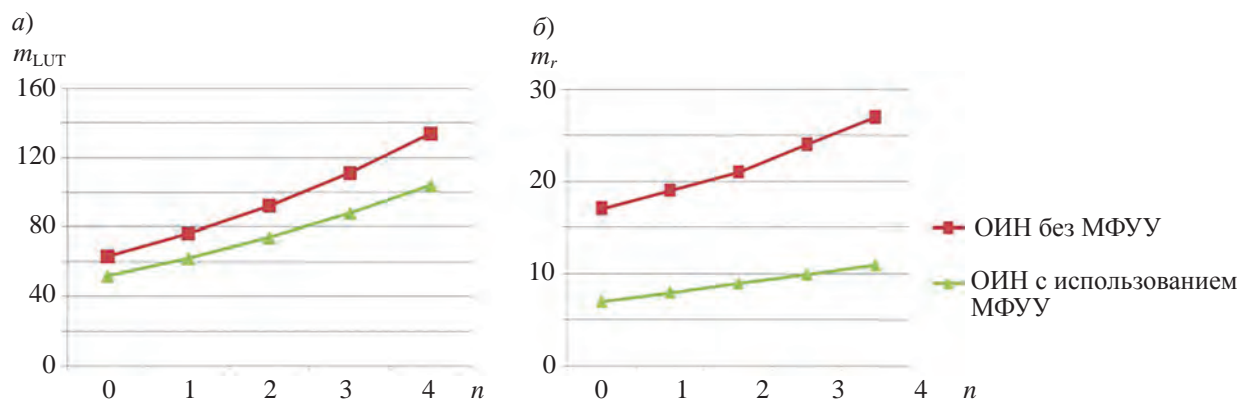


Рис. 5

Заключение. По результатам проведенной работы можно сделать вывод о целесообразности применения МФУУ для реализации системы управления формированием ИАЦП в ОИН: это позволяет снизить общие аппаратные затраты на 20–25 % (в зависимости от параметров сети), а также уменьшить число связей между входными нейронами и ОИН до одной вместо 3–5 между каждым входным нейроном и ОИН, что также упрощает топологию и снижает вероятность возникновения отказов при коммутации нейронов. Однако применение МФУУ требует дальнейших исследований, чтобы:

- определить и учесть дополнительную временную задержку на объединение разделенных между ОИН триггеров в общий счетчик;
- установить влияние дополнительной линии связи между ОИН для формирования МФУУ на затраты (возможно, стоит использовать комбинацию служебных флагов для управления формированием счетчиков по существующим линиям: эхо-запроса или эхо-ответа);
- рассмотреть варианты ускорения этапа формирования ИАЦП, например, за счет использования увеличенной тактовой частоты по сравнению с основной, на которой производится измерение.

Дополнительным преимуществом применения МФУУ для организации управления маршрутизацией сигналов в однослойной НС самомаршрутизирующегося АЦП является унификация функциональных и принципиальных схем ОИН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чертовской В. Д. Теория управления: автоматические и автоматизированные системы // Вестник Вологодского государственного университета. Сер. Технические науки. 2023. № 3(21). С. 44–50.
2. Пупков К. А., Егунов Н. Д., Рыбаков К. А., Сотскова И. Л. и др. Нестационарные системы автоматического управления: анализ, синтез и оптимизация. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007. 631 с.
3. Бродин В. Б., Шагурин И. И. Микроконтроллеры. Архитектура, программирование, интерфейс. М.: Изд-во ЭКОМ, 1999. 400 с.
4. Liu G., Li G., Peng Z., Pan H. Adaptive neural network dynamic surface control algorithm for pneumatic servosystem // Proc. of the 11th Intern. Conf. on Modelling, Identification and Control (ICMIC2019). Lecture Notes in Electrical Engineering, Tianjin, China, 2019. P. 821–829.
5. Бойков В. И., Быстров С. В., Волков И. С., Коровьяков А. Н. Экспериментальная оценка показателей аналого-цифровых преобразователей микроконтроллеров // Изв. вузов. Приборостроение. 2007. Т. 50, № 11. С. 73–76.
6. Самойлов Л. К., Денисенко Д. Ю., Прокопенко Н. Н. Динамические погрешности процесса ввода аналоговых сигналов датчиков в системах управления и контроля. М.: СОЛОН-Пресс, 2021. 240 с.
7. Мартыанов П. С. Применение цифровой элементной базы для реализации аналоговых устройств // Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации: Тр. XVI Междунар. науч.-техн. конф. Суздаль, 09–12 октября 2023 года. М.: Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, 2023. С. 234–238.

8. Пикина Г. А., Пащенко Ф. Ф., Пащенко А. Ф. О некоторых проблемах реализации теории оптимального управления в задачах автоматического регулирования // Датчики и системы. 2022. № 3(262). С. 3–8.
9. Lee C., Lee S., Chu B. Extension of Quadcopter Flight Range Based on Quadcopter Transport System and Autonomous Ramp Flight Algorithm // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 156422–156432.
10. Каразин В. И., Хисамов А. В. Разработка систем автопилотирования транспортными средствами // Теория механизмов и машин. 2019. Т. 17, № 4(44). С. 149–157.
11. Волков Д. А., Саяпин А. В., Сафонов К. В., Кузнецов А. А. Дистанционно управляемый подводный аппарат в форме квадрокоптера: особенности конструкции и системы управления // Сибирский журнал науки и технологий. 2020. Т. 21, № 2. С. 163–169. DOI: 10.31772/2587-6066-2020-21-2-163-169.
12. Глазунов А. Н., Ефимов А. А. Исследование интегрированных схем изолирования аналого-цифровых преобразователей // I-methods. 2023. Т. 15, № 2.
13. Жолондковский В. В., Бочаров Ю. И., Таранин М. В. и др. Средства аппаратной поддержки вычислений в области искусственного интеллекта // Датчики и системы. 2021. № 5(258). С. 20–25.
14. Фомин А. В. Адаптивное управление печами отжига металла на основе нейросетевой настройки параметров линейных регуляторов. М.: РОСА, 2023. 146 с.
15. Yuguo Xiang, Min Chen, Danfeng Zhai, Yutong Zhao, Junyan Ren, Fan Ye. A neural network based background calibration for pipelined-SAR ADCs at low hardware cost // Electronics Letters. 2023. Vol. 59, N 15. P. 1–3.
16. Посягин А. И., Южаков А. А. Парадигма построения самонастраивающегося аналого-цифрового преобразователя на основе нейронной сети // XII Всерос. совещание по проблемам управления ВСПУ-2014. М., 16–19 июля 2014 г. М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2014. С. 7159–7165.
17. Макагонов Н. Г., Посягин А. И., Южаков А. А. Принципы самонастройки сигналов в аналого-цифровом преобразователе на основе однослойной нейронной сети // Электротехника. 2016. № 11. С. 3–6.
18. Васбиева А. Ф., Елтышев А. В., Посягин А. И., Южаков А. А. Обзор нейросетевого аналого-цифрового преобразователя с архитектурой многоуровневого кольца // Междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям. 2017. Т. 2. С. 228–231.
19. Наборщиков А. А., Посягин А. И., Южаков А. А. Анализ алгоритмов проведения процедуры самодиагностики в аналого-цифровом преобразователе на основе нейронной сети // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2024. № 1(61). С. 35–46.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Антон Алексеевич Наборщиков

— Пермский национальный исследовательский политехнический университет, кафедра автоматизации и телемеханики; старший преподаватель; E-mail: anton.naborshikov@gmail.com

Антон Игоревич Посягин

— канд. техн. наук; Пермский национальный исследовательский политехнический университет, кафедра автоматизации и телемеханики; доцент; E-mail: posyagin.anton@gmail.com

Егор Дмитриевич Путин

— студент; Пермский национальный исследовательский политехнический университет, кафедра автоматизации и телемеханики; E-mail: ieghor.putin.080703@gmail.com

Александр Анатольевич Южаков

— д-р техн. наук, профессор; Пермский национальный исследовательский политехнический университет, кафедра автоматизации и телемеханики; зав. кафедрой; E-mail: uz@at.pstu.ru

Поступила в редакцию 07.11.24; одобрена после рецензирования 19.11.24; принята к публикации 25.04.25.

REFERENCES

1. Chertovskoy V.D. *Bulletin of Vologda State University. Ser. Technical Sciences*, 2023, no. 3(21), pp. 44–50. (in Russ.)
2. Pupkov K.A., Egupov N.D., Rybakov K.A., Sotskova I.L. et al. *Nestatsionarnyye sistemy avtomaticheskogo upravleniya: analiz, sintez i optimizatsiya* (Non-stationary Automatic Control Systems: Analysis, Synthesis and Optimization), Moscow, 2007, 631 p. (in Russ.)
3. Brodin V.B., Shagurin I.I. *Mikrokontrollery. Arkhitektura, programmirovaniye, interfeysy* (Microcontrollers. Architecture, Programming, Interface), Moscow, 1999, 400 p. (in Russ.)
4. Liu G., Li G., Peng Z., Pan H. *Proc. of the 11th Intern. Conf. on Modelling, Identification and Control (ICMIC2019)*, Lecture Notes in Electrical Engineering, Tianjin, China, 2019, pp. 821–829.

5. Boykov V.I., Bystrov S.V., Volkov I.S., Korovyakov A.N. *Journal of Instrument Engineering*, 2007, no. 11(50), pp. 73–76. (in Russ.)
6. Samoilov L.K., Denisenko D.Yu., Prokopenko N.N. *Dinamicheskiye pogreshnosti protsessa vvoda analogovykh signalov datchikov v sistemakh upravleniya i kontrolya* (Dynamic Errors in the Process of Inputting Analog Signals from Sensors in Control and Monitoring Systems), Moscow, 2021, 240 p. (in Russ.)
7. Martyanov P.S. *Akustoopticheskiye i radiolokatsionnyye metody izmereniy i obrabotki informatsii* (Acousto-optic and Radar Methods of Measurements and Information Processing), Proceedings of the XVI International Scientific and Technical Conference, Suzdal, October 9–12, 2023. Moscow, 2023, pp. 234–238. (in Russ.)
8. Pikina G.A., Pashchenko F.F., Pashchenko A.F. *Sensors and Systems*, 2022, no. 3(262), pp. 3–8. (in Russ.)
9. Lee C., Lee S., Chu B. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 156422–156432.
10. Karazin V.I., Khisamov A.V. *Teoriya mekhanizmov i mashin*, 2019, no. 4(17), pp. 149–157. (in Russ.)
11. Volkov D.A., Sayapin A.V., Safonov K.V., Kuznetsov A.A. *Siberian Journal of Science and Technology*, 2020, no. 2(21), pp. 163–169. (in Russ.)
12. Glazunov A.N., Efimov A.A. *I-methods*, 2023, no. 2(15). (in Russ.)
13. Zholondkovsky V.V., Bocharov Yu.I., Taranin M.V. et al. *Sensors and Systems*, 2021, no. 5(258), pp. 20–25. (in Russ.)
14. Fomin A.V. *Adaptivnoye upravleniye pechami otzhiga metalla na osnove neyrosetevoy nastroyki parametrov lineynykh regulyatorov* (Adaptive Control of Metal Annealing Furnaces Based on Neural Network Tuning of Linear Controller Parameters), Moscow, 2023, 146 p. (in Russ.)
15. Yuguo Xiang, Min Chen, Danfeng Zhai, Yutong Zhao, Junyan Ren, Fan Ye, *Electronics Letters*, 2023, no. 15(59), pp. 1–3.
16. Posyagin A.I., Yuzhakov A.A. *XII vserossiyskoye soveshchaniye po problemam upravleniya VSPU-2014* (XII All-Russian Conference on Control Problems VSPU-2014), Moscow, V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Sciences, July 16–19, 2014, Moscow, pp. 7159–7165. (in Russ.)
17. Makagonov N.G., Posyagin A.I., Yuzhakov A.A. *Electrical Engineering*, 2016, no. 11, pp. 3–6. (in Russ.)
18. Vasbieva A.F., Eltyshv A.V., Posyagin A.I., Yuzhakov A.A. *Mezhdunarodnaya konferentsiya po myagkim vychisleniyam i izmereniyam* (International Conference on Soft Computing and Measurements), 2017, vol. 2, pp. 228–231. (in Russ.)
19. Naborshchikov A.A., Posyagin A.I., Yuzhakov A.A. *Bulletin of the Volga State Technological University. Series: Radio engineering and infocommunication systems*, 2024, no. 1(61), pp. 35–46. (in Russ.)

DATA ON AUTHORS

- | | |
|------------------------------|---|
| Anton A. Naborshikov | — Perm National Research Polytechnic University, Department of Automation and Telemechanics; Senior Lecturer; E-mail: anton.naborshikov@gmail.com |
| Anton I. Posyagin | — PhD, Associate Professor; Perm National Research Polytechnic University, Department of Automation and Telemechanics; E-mail: posyagin.anton@gmail.com |
| Egor D. Putin | — Perm National Research Polytechnic University, Department of Automation and Telemechanics; E-mail: ieghor.putin.080703@gmail.com |
| Alexander A. Yuzhakov | — Dr. Sci., Professor; Perm National Research Polytechnic University, Department of Automation and Telemechanics; Head of the Department; E-mail: uz@at.pstu.ru |

Received 07.11.24; approved after reviewing 19.11.24; accepted for publication 25.04.25.