

ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья
УДК 621.316.722

EDN: ZAWNJJ

DOI: 10.21285/1814-3520-2024-4-504-520



Многоканальный элемент выбора медианного сигнала

К.А. Ахтырский^{1✉}, В.А. Кабиров², В.Д. Семенов³, Д.С. Торгаева⁴^{1,3}Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия²Томский политехнический университет, Томск, Россия⁴Акционерное общество «Научно-производственная фирма «Микран», Томск, Россия

Резюме. Цель – разработать новый вариант структуры N-канального универсального элемента выбора медианного сигнала с функцией исключения неиспользуемых входов, предназначенный для создания высоконадежных резервированных модульных систем электропитания космических аппаратов. Для проведения исследования и проверки работоспособности предложенной структуры N-канального элемента использовалась имитационная модель 7-канального элемента выбора, разработанная в Matlab Simulink. Для проверки работоспособности предложенного элемента выбора на программируемой логической интегральной схеме Altera Cyclone IV EP4CE115F29C7 использовался модельно-ориентированный подход к проектированию, включающий в себя применение инструментов Matlab Simulink для автоматической генерации кода для программируемой логической интегральной схемы. Предложена структура N-канального элемента выбора медианного сигнала с функцией исключения неиспользуемых входов из выборки определения медианного сигнала, позволяющая использовать для определения медианного сигнала только те входы элемента выбора, к которым подключены сигналы с работающих модулей в составе системы электропитания. Имитационное моделирование элемента выбора медианного сигнала показало, что, в отличие от существующих аналогов, элемент выбора медианного сигнала по предложенной структуре обеспечивает передачу искомого медианного сигнала на свой выход при уменьшении количества используемых входных сигналов от N до 1. Реализация IP-блока элемента выбора на базе программируемой логической интегральной схемы Altera Cyclone IV EP4CE115F29C7 показала эффективность использования ресурсов, занимая 541 логическую ячейку, а также полное соответствие разработанного IP-блока его заявленной логике работы. Представленная структура элемента выбора может быть использована для создания высоконадежных резервированных систем электропитания космических аппаратов, способных сохранять работоспособность при отказе всех модулей, вплоть до последнего. Разработанное решение может применяться в системах электропитания космических аппаратов с повышенными требованиями к отказоустойчивости.

Ключевые слова: элемент выбора медианного сигнала, глубокое резервирование, надежность, система электропитания, космический аппарат, имитационное моделирование

Для цитирования: Ахтырский К.А., Кабиров В.А., Семенов В.Д., Торгаева Д.С. Многоканальный элемент выбора медианного сигнала // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 4. С. 504–520. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-4-504-520>. EDN: ZAWNJJ.

POWER ENGINEERING

Original article

Multi-channel adaptive median signal filter

Kirill A. Akhtyrskiy^{1✉}, Vagiz A. Kabirov², Valeriy D. Semenov³, Darya S. Torgaeva⁴^{1,3}Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia²Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia⁴Research and Production company Micran Joint Stock Company, Tomsk, Russia

Abstract. This study aims to develop a novel structure of an N-channel adaptive median signal filter with dynamic input exclusion. The proposed design is intended for highly reliable, fault-tolerant modular redundant power supply systems for spacecraft. To investigate the functionality of the proposed N-channel filter, we developed a simulation model for a 7-channel median signal filter using MATLAB Simulink. A model-based design approach was applied to validate the performance of the proposed element using the Altera Cyclone IV EP4CE115F29C7 field-programmable gate array (FPGA). The verification process involved the use of automatic code generation tools within

MATLAB Simulink for the FPGA implementation. A novel structure of the N-channel median signal filter was proposed, featuring a dynamic exclusion of unused inputs from the median calculation. This guarantees that only valid input signals from operational modules within the power supply system be included in the median calculation. The simulation results demonstrated that, in contrast to existing counterparts, the proposed filter is capable of reliably outputting the median signal as the number of active input signals decreases from N to 1. The implementation of the filter as an intellectual property (IP) block based on the Altera Cyclone IV EP4CE115F29C7 FPGA demonstrated efficient resource utilisation, occupying 541 logic cells, while fully adhering to the specified operational logic. The proposed structure of the adaptive median signal filter can be employed in highly reliable, fault-tolerant spacecraft redundant power supply systems, maintaining functionality even in the event of multiple module failures, down to the last operational module. The developed solution meets the stringent fault-tolerance requirements of spacecraft power systems.

Keywords: median signal selection element, deep redundancy, reliability, power supply system, spacecraft, simulation modeling

For citation: Akhtryrskiy K.A., Kabirov V.A., Semenov V.D., Torgaeva D.S. Multi-channel adaptive median signal filter. *iPolytech Journal*. 2024;28(4):504-520. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-4-504-520>. EDN: ZAWNJJ.

ВВЕДЕНИЕ

Многоканальные элементы выбора медианного сигнала находят применение в автоматике и цифровой вычислительной технике и могут быть использованы для построения функциональных узлов высоконадежных технических систем автоматического регулирования и управления, в том числе резервированных, рассчитанных на количество отказов более одного [1].

Любой беспилотный космический аппарат (КА) представляет собой совокупность полезной нагрузки обслуживающих систем и бортового комплекса связи и управления [2]. Состав полезной нагрузки космического аппарата и ее требуемая мощность напрямую зависят от области его применения и изменяются в широких пределах от сотен ватт до десятков киловатт [3]. Космические аппараты выпускаются в единственном экземпляре или мелкими сериями, поэтому разработка систем электропитания под каждую конкретную задачу является трудоемкой и дорогостоящей, но в настоящее время в связи с созданием больших группировок спутников [4–6] ситуация поменялась, поэтому выпуск космических аппаратов может быть крупносерийным. Это связано с появлением проектов по созданию спутниковых систем, предназначенных для высокоскоростной широкополосной передачи данных. Такие спутниковые системы в настоящее время насчитывают в своем составе до 6 тыс. спутников, и запланировано их расширение более чем до 40 тыс. спутников, одновременно находящихся на орбите [7]. В связи с этим в настоящее время являются актуальными разработки систем электропитания космиче-

ских аппаратов (СЭП КА) с использованием унифицированных модулей преобразования энергии, позволяющих обеспечивать требуемую выходную мощность путем изменения числа параллельно включенных модулей [8–12]. В настоящее время проводятся многими промышленными предприятиями и коллективами ученых разработки модульных СЭП КА, однако такие разработки обладают рядом недостатков, связанных с реализацией равномерного деления токов между модулями при их параллельном соединении. Так, в СЭП семейства спутников Alphabus [13] равномерное распределение токов между параллельно подключенными модулями достигается с помощью системы управления, вынесенной в отдельный (центральный) модуль системы. В состав центрального модуля входит резервированный главный усилитель ошибки и не резервированный мажоритарный элемент. Такое техническое решение приводит к усложнению всей конструкции СЭП, а также негативно влияет на ее долговечность, т.к. весь центральный модуль системы и мажоритарный элемент в его составе не резервируются. В работе [14] представлена реализация модульного источника питания для ионно-плазменной установки. В предложенном авторами подходе к построению системы равномерное распределение тока нагрузки между параллельно включенными модулями достигается за счет применения принципа «ведущий – ведомый». В данной конфигурации один модуль (силовой блок) играет роль ведущего, принимая от блока управления сигналы, задающие требуемые значения выходного тока, напряжения и мощности, и передавая их ведомым

модулям. Блок управления контролирует выходную мощность ведущего модуля и устанавливает такой же уровень мощности для всех остальных модулей. Недостатком такого принципа построения СЭП является то, что при выходе из строя ведущего модуля ведомые модули потеряют источник сигнала, задающего уровень выходной мощности, тока и напряжения, что повлечет за собой выход из строя всей системы. Избавиться от данного недостатка можно путем введения в систему резервных ведущих модулей или реализации системы таким образом, чтобы все модули в ее составе являлись одинаковыми и равноправными.

В работе [15] предложено решение по построению ЭПК мощностью до 20,4 кВт на основе автономного унифицированного модуля стабилизации напряжения (МСН) мощностью 850 Вт и выходным напряжением 100 В. Данное техническое решение подразумевает реализацию цифровой системы управления силовыми преобразователями на программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС). При этом в каждом модуле МСН имеется свой контур регулирования напряжения, который на основании отклонения выходного напряжения от своего задающего напряжения вычисляет свой индивидуальный сигнал управляющего воздействия, что приведет к разбросу управляющих воздействий на каждом из унифицированных модулей и их неравномерной нагрузке по току. Для исключения неравномерной нагрузки унифицированных модулей по току в работе [15] предлагается управлять всеми унифицированными модулями единым сигналом управляющего воздействия, выбранным по медианному признаку из индивидуальных сигналов управляющего воздействия всех модулей. Для этого требуется реализовать вариант элемента выбора одного сигнала управляющего воздействия из N входных сигналов с количеством входов, равным количеству модулей МСН в ЭПК.

Таким образом, элемент выбора медианного сигнала должен выполнять функцию выбора одного сигнала управляющего воздействия, имеющего медианное значение среди нескольких входных сигналов, которые генерируются каналами обратных связей по напряжению каждого МСН; обеспечить равномерное деление токов между модулями

без деления унифицированных модулей на ведущие и ведомые; повысить надежность, отказоустойчивость и живучесть СЭП за счет глубокого резервирования МСН (два отказа и более), при этом резервирование проводится на уровне модулей МСН. Это означает, что каждый МСН (помимо своего контура регулирования напряжения) должен иметь свой элемент выбора медианного сигнала, относящийся к этому модулю и принимающий на входы сигналы управляющего воздействия от всех модулей в составе системы (включая сигнал управляющего воздействия своего модуля). Это позволит сделать модули полностью «равноправными», благодаря чему система будет сохранять работоспособность при отказе любого модуля в своем составе.

ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ВЫБОРА МЕДИАННОГО СИГНАЛА

В настоящее время в системах, разрабатываемых для применения в жестких условиях, таких как условия космического пространства, наиболее широко распространено резервирование элементов по принципу «2 из 3» и «3 из 5» [16]. Применительно к выбору сигналов управляющего воздействия или команд управления из набора соответствующих сигналов такое резервирование реализуется с помощью мажоритарных и медианных элементов. В мажоритарных элементах достоверность сигнала определяется по принципу «большинства»: достоверным считается одинаковый сигнал (в аналоговых схемах принимается, что сигналы имеют одинаковое значение (величину), если их значения отличаются на меньшую величину определенного порогового значения) на большинстве входов элемента. В медианных элементах (элементах выбора медианного сигнала) достоверность сигнала определяется по медианному принципу: достоверным считается сигнал, величина которого занимает медианное положение в списке величин всех входных сигналов элемента, отсортированных по их возрастанию.

В работе [17] предлагается использовать медианный идентификатор, позволяющий реализовать резервирование систем по принципу «2 из 3». Сортировка по возрастанию величин входных сигналов предлагаемого элемента осуществляется путем их одновременного сравнения с опорным сигнала-

лом, величина которого возрастает по линейному закону до максимально допустимой величины входных сигналов элемента. Сравнение величин входных сигналов с величиной опорного сигнала производится с помощью трех компараторов. В связи с тем, что величина опорного сигнала линейно нарастает, а величины входных сигналов за период изменения опорного сигнала практически не изменяются, номер компаратора, сработавшего вторым, является номером входного сигнала, величина которого занимает медианное положение среди трех входных сигналов (т.к. компаратор, срабатывающий первым, идентифицирует сигнал, имеющий наименьшую величину, а компаратор, сработавший третьим, – сигнал, имеющий наибольшую величину). Автором предложена схема передачи соответствующего входного сигнала на выход элемента путем коммутации управляемого переключателя. Предложенная автором схема может быть обобщена для реализации N -канального медианного идентификатора. Недостатком предложенного автором подхода к определению медианного сигнала является ограничение быстродействия его вычисления, которое определяется периодом изменения опорного сигнала. При работе с 14-разрядными входными сигналами на частоте тактирования генератора опорного сигнала, равной 200 МГц, период вычисления медианного сигнала составит около 82 мкс. Учитывая то, что для работы импульсных преобразователей в составе МСН, построенных по структуре, предложенной в работе [15], вычисление медианного сигнала должно производиться не менее одного раза за период управляющего сигнала преобразователя, максимальная частота работы преобразователей при использовании предложенного медианного идентификатора составит 12,2 кГц. Такая частота является недопустимо малой для реализации современных импульсных преобразователей для СЭП КА, поскольку с ее уменьшением увеличиваются габариты и масса преобразователей, а, следовательно, и всей СЭП КА.

Предложенный в работе [18] ранговый фильтр позволяет идентифицировать и передавать на выход один из N входных сигналов, имеющий искомый ранг (рангом сигнала является его номер в отсортированном по величине списке значений входных сигналов).

Искомый ранг сигнала задается в рассматриваемом устройстве с помощью комбинации из двух логических управляющих сигналов. Допустимые комбинации управляющих сигналов задают один из следующих искомых рангов: *ранг минимального*, *ранг максимального* или *ранг медианного сигнала*. Это позволяет использовать предложенное устройство в качестве элемента выбора медианного сигнала путем задания соответствующей комбинации управляющих сигналов. Алгоритм идентификации сигнала, имеющего искомый ранг, реализуется путем использования селекторов, причем количество входов каждого селектора становится больше с увеличением количества N входных сигналов рангового фильтра. Кроме того, количество селекторов находится в факториальной зависимости от N . Это приводит к тому, что для решения задачи идентификации медианного сигнала из 7 входных сигналов понадобится ранговый фильтр, реализация которого на ПЛИС потребует около 4 тыс. логических ячеек. При этом реализация 25-канального медианного идентификатора потребует более 5 млн логических ячеек ПЛИС. Учитывая то, что производители современных ПЛИС предлагают решения, содержащие не более нескольких сотен тысяч логических ячеек, реализация на ПЛИС рассмотренного рангового фильтра с количеством входов более 11 в настоящее время не представляется возможной. Кроме того, данный ранговый фильтр обеспечивает передачу на выход достоверного сигнала только до отказа половины модулей в составе СЭП, что не позволяет применить данное устройство для реализации СЭП с большой глубиной резервирования модулей, то есть СЭП, сохраняющих работоспособность при отказе более половины модулей в своем составе.

В работе [19] предложено техническое решение для реализации N -канального элемента выбора одного из входных сигналов любого заданного ранга от 0 до $N-1$, что позволяет использовать данный элемент в качестве элемента выбора медианного сигнала (задав ранг медианного сигнала в качестве искомого) при построении СЭП КА на основе автономных унифицированных МСН. Функциональная схема данного элемента выбора одного из входных сигналов представлена на рис. 1.

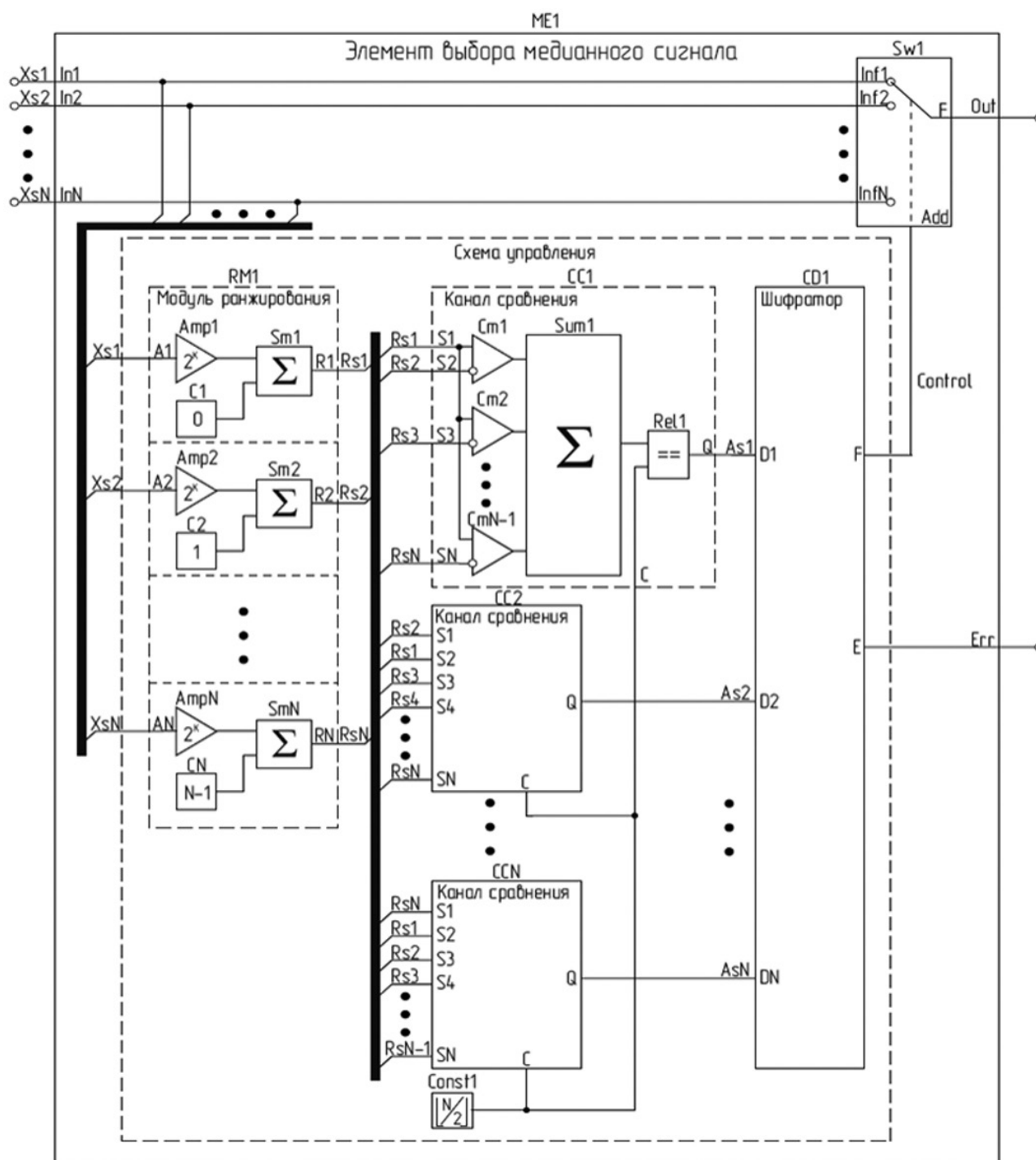


Рис. 1. Функциональная схема N -канального элемента выбора одного из входных сигналов

Fig. 1. N -channel element cross-functional flowchart for selecting one of input signals

Предложенный авторами элемент осуществляет сравнение каждого входного сигнала с каждым с помощью N каналов сравнения CC_i , которые определяют, соответствует ли ранг этого сигнала заданному (искомый ранг сигнала задается с помощью блока константы $Const1$, значение сигнала на выходе которого при определении медианного сигнала вычисляется по вы-

ражению (1), причем канал сравнения, на первый (опорный) вход $S1$ которого приходит сигнал, имеющий заданный ранг, передает на свой выход Q логическую единицу, а все остальные каналы сравнения передают логические нули.

$$Const1_{Med} = \left\lfloor \frac{N}{2} \right\rfloor, \quad (1)$$

где $\lfloor \cdot \rfloor$ – операция округление результата до целого в меньшую сторону; $Const1_{Med}$ – ранг элемента, занимающего медианное положение в отсортированном по возрастанию векторе значений входных сигналов.

Для определения номера входного сигнала, ранг которого соответствует заданному, используется шифратор $CD1$, входными сигналами которого являются выходные сигналы Q каналов сравнения, причем к i -му входу шифратора подключен выход i -го канала сравнения. На выходе F шифратора формируется цифровой сигнал, значение которого равно номеру канала сравнения, на выходе которого сформирована логическая единица. Это значение равно номеру входа элемента выбора, на который подается сигнал, имеющий заданный ранг. Полученный номер входа элемента выбора передается на управляющий вход Add управляемого переключателя $Sw1$, который, исходя из полученного значения, передает на выход Out элемента выбора соответствующий входной сигнал заданного ранга. Достоинством данного элемента выбора является его быстродействие. Это обеспечивается за счет того, что рассматриваемый элемент выбора реализуется на ПЛИС, что позволяет обеспечить параллельную работу каналов сравнения, т.е. вычисления в каждом из них производятся одновременно. Учитывая то, что логическая схема каналов сравнения и других блоков данного элемента является комбинационной, время вычислений, производимых с помощью нее, определяется временем распространения сигналов в схеме. Кроме того, количество логических ячеек в ПЛИС, требуемых для реализации элемента выбора, увеличивается по закону, близкому к линейному, с увеличением количества входов элемента выбора. Это позволяет реализовать данный элемент выбора с количеством входов $N = 11$ и более с использованием представленных на сегодняшний день на рынке ПЛИС. Однако данный элемент выбора медианного сигнала не может использоваться для построения СЭП с повышенными требованиями к резервированию в связи с тем, что он обеспечивает работоспособность СЭП только до отказа не более половины модулей. Таким образом, при отказе еще хотя бы одного модуля вся СЭП теряет работоспособность в связи с тем, что элемент выбора

передает на выход недоверенный сигнал управляющего воздействия. Поэтому рассматриваемый элемент выбора не может быть использован для построения СЭП, обладающих повышенной живучестью, то есть сохраняющих работоспособность при отказе более половины модулей.

Таким образом, недостатки рассмотренных выше решений для реализации элемента выбора медианного сигнала позволяют сформулировать существующую проблему, связанную с необходимостью создания N -канального универсального элемента выбора медианного сигнала для реализации высоконадежных резервированных СЭП КА, сохраняющих работоспособность вплоть до отказа последнего модуля стабилизации напряжения в своем составе.

ИДЕЯ (ГИПОТЕЗА) РЕШЕНИЯ И ДОСТИЖИМЫЕ ПРИ ЭТОМ ЦЕЛИ

Идея данной работы состоит в модификации алгоритма поиска медианного сигнала среди N входных сигналов таким образом, чтобы для определения медианного сигнала использовались только те входы элемента выбора, к которым подключены сигналы с работающих модулей. То есть элемент выбора, построенный по модифицированной структуре, должен обладать функцией определения неиспользуемых входов (неиспользуемых по причине отказа соответствующих модулей или их физического отсутствия в конкретной СЭП) и их исключения из алгоритма поиска медианного сигнала. Это позволит реализовать СЭП КА с повышенной живучестью и глубиной резервирования (нагруженного и ненагруженного), сохраняющих работоспособность при изменении числа входных сигналов элемента выбора от N до 1, благодаря чему СЭП КА будет способна продолжать работу вплоть до отказа последнего унифицированного модуля в ее составе. При этом предполагается, что элемент выбора должен обеспечивать высокое быстродействие, которое позволит ему обеспечивать стабильную работу импульсных преобразователей в составе модулей СЭП на высокой частоте коммутации. Предлагаемая функциональная схема элемента выбора медианного сигнала с функцией определения неиспользуемых входов и их исключения из алгоритма поиска медианного сигнала представлена на рис. 2.

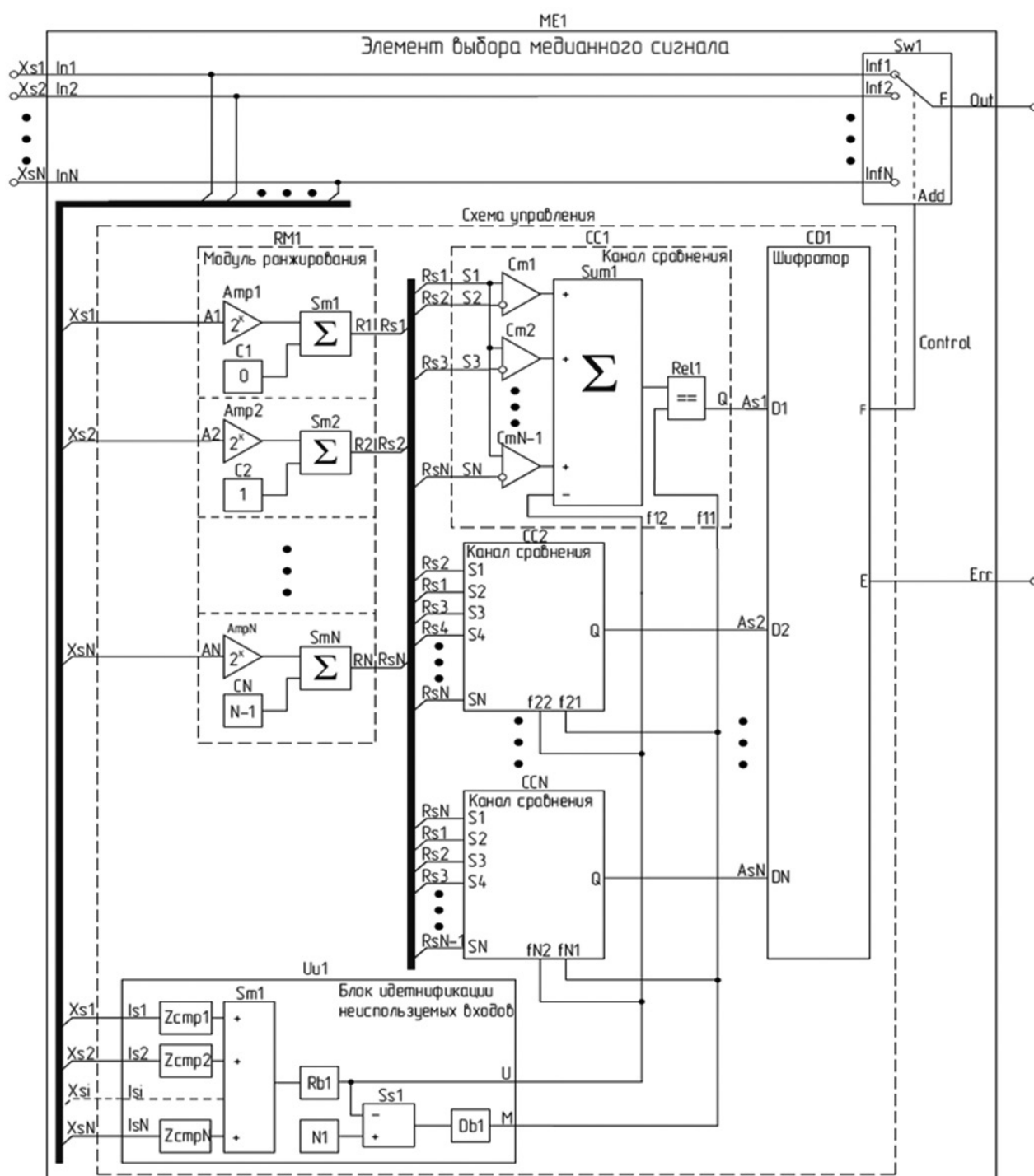


Рис. 2. Функциональная схема N -канального элемента выбора медианного сигнала с функцией определения неиспользуемых входов

Fig. 2. N -channel element cross-functional flowchart for selecting a median signal with the function of unused input detection

Предлагаемая модификация алгоритма работы элемента выбора медианного сигнала заключается во введении в структуру элемента выбора, представленную на рис. 1 блока идентификации неиспользуемых входов $UU1$ вместо блока константы $Const1$. На входы $Is1$ - IsN данного блока поступают входные сигналы ($Xs1$ - XsN) элемента выбо-

ра. Данный блок вычисляет округленное до ближайшего меньшего или равного четного числа количество неиспользуемых входов элемента выбора и передает результат на выход U . На выходе M данного блока формируется число, равное рангу сигнала, занимающего медианное положение среди оставшихся используемых входов. Ранг ме-

дианного сигнала с учетом только используемых входов элемента выбора определяется по выражению (2):

$$r_{med} = \left\lfloor \frac{N - X_{ок}}{2} \right\rfloor, \quad (2)$$

где r_{med} – искомый ранг медианного сигнала среди сигналов, поступающих на используемые входы; N – количество каналов элемента выбора медианного сигнала; $X_{ок}$ – число X неиспользуемых входов, округленное до ближайшего меньшего или равного четного числа.

Таким образом, при выборе медианного сигнала из 7 произвольно меняющихся входных сигналов $X_{с1}$ – $X_{с7}$, если число неиспользуемых входов элемента равно нулю, ранг медианного сигнала, в соответствии с формулой (2), равен $r_{med} = 3$.

Вход блока $UU1$ (а значит, и соответствующий вход элемента выбора) считается неиспользуемым, если на него подается отрицательное число (допустим, -1). Таким образом, данный блок выполняет две функции: определение количества неиспользуемых входов элемента выбора и расчет ранга медианного сигнала среди используемых входов, т.е. ранг медианного сигнала, в отличие от предложенного в [19] элемента выбора, определяется не однократно, а многократно в динамическом режиме.

Кроме того, для обеспечения работы механизма исключения неиспользованных входов и динамического расчета ранга медианного сигнала среди оставшихся используемых сигналов необходимо модифицировать алгоритм работы каналов сравнения следующим образом. Сумматор Sum_i каждого канала сравнения нужно заменить на сумматор-вычитатель с $N-1$ входами сложения и одним входом вычитания, причем выходные сигналы компараторов Cmi соответствующего канала сравнения подключаются к входам сложения сумматора-вычитателя. Каждый канал сравнения в модифицированной структуре элемента выбора медианного сигнала содержит 2 управляющих входа: $fi1$ и $fi2$ (где i – номер канала сравнения). Вход $fi2$ каждого канала сравнения подключается к выходу U блока идентификации неиспользуемых входов $UU1$, а вход $fi1$ – к выходу M блока $UU1$. Сигнал с входа $fi2$ канала сравнения подключается к вычитающему входу сумматора-вычитателя. Значение сигнала на данном входе равно количеству

неиспользуемых входов элемента выбора. Так как на неиспользуемые входы элемента выбора поступают сигналы, имеющие отрицательное значение, в упорядоченной по величине выборке входных сигналов эти сигналы будут иметь наименьший ранг (ранг любого из X неиспользуемых входов N -канального элемента выбора не может быть больше чем $X-1$. При этом ранг сигнала, имеющего наименьшее значение среди используемых, равен X). При этом значение сигнала на выходе U равно либо X , если X – четное число, либо $X-1$, если X – нечетное число. Таким образом, если на первый вход канала сравнения поступает сигнал с одного из неиспользуемых входов элемента выбора, то на выходе сумматора-вычитателя будет либо отрицательное число, либо ноль. Формирование нуля на выходе сумматора-вычитателя при подаче на первый вход канала сравнения одного из сигналов с используемых входов означает, что сигнал, поступающий на первый вход данного канала сравнения, либо имеет минимальный ранг среди всех используемых входных сигналов, а не медианный, либо что соответствующий вход элемента выбора – единственный используемый, что делает этот сигнал медианным.

На выходе сумматора-вычитателя формируется сигнал, значение которого равно числу используемых сигналов, величины которых меньше величины сигнала, поступающего на опорный вход канала сравнения, что по определению является рангом данного сигнала среди используемых сигналов. Затем это число (ранг сигнала, являющегося опорным для соответствующего канала) сравнивается с помощью блока сравнения $Reli$ с искомым рангом (поступающим на вход $fi1$ данного канала сравнения с выхода M блока $UU1$). В случае их равенства на выходе блока сравнения формируется логическая единица, что свидетельствует о том, что опорным сигналом данного канала сравнения является искомый медианный сигнал. В противном случае на выходе блока сравнения формируется логический ноль. Сформированный выходной сигнал блока сравнения $Reli$ передается на выход Q соответствующего канала сравнения CCi . Выходные сигналы Qi каналов сравнения CCi являются входными для шифратора $CD1$, логика работы которого идентична логике работы шифратора из структуры элемента выбора, описанного в [19]. Значение выходного сиг-

нала шифратора CD1 равно номеру канала элемента выбора, на вход которого поступает сигнал, имеющий ранг медианного среди используемых сигналов. Этот сигнал является управляющим для управляемого переключателя Sw1, который коммутирует соответствующий сигнал на выход Out элемента выбора.

ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ЭЛЕМЕНТА ВЫБОРА МЕДИАННОГО СИГНАЛА И СРАВНЕНИЕ ЕЕ РАБОТЫ С РАБОТОЙ ЭЛЕМЕНТА ВЫБОРА МЕДИАННОГО СИГНАЛА БЕЗ ИСКЛЮЧЕНИЯ НЕИСПОЛЬЗУЕМЫХ ВХОДОВ

Для проверки работоспособности описанного выше алгоритма работы элемента выбора медианного сигнала на основе описанной выше функциональной схемы (рис. 2) в среде Matlab Simulink была разработана имитационная модель 7-канального элемента выбора медианного сигнала с функцией исключения неиспользуемых входов. Кроме того, для сравнения предложенной реализации элемента выбора с реализацией, описанной в [19], имитационное моделирование двух элементов выбора проводилось совместно с одинаковыми наборами входных сигналов. На рис. 3 приведена разработанная имита-

ционная модель для исследования работы двух элементов выбора медианного сигнала.

На представленной модели ЭВСМ1 – элемент выбора медианного сигнала с функцией исключения неиспользуемых входов (по структуре, представленной на рис. 2), ЭВСМ2 – элемент выбора медианного сигнала (в блоке константы Const1 задан ранг 3, что соответствует рангу медианного сигнала из 7 сигналов) без функции исключения неиспользуемых входов (по структуре, представленной на рис. 1). Для наглядной демонстрации работы элементов выбора, на их входы подается 7 цифровых синусоидальных сигналов Xs1-Xs7 с частотой 1 кГц, амплитудой $2^{14}-1$ и постоянной составляющей 2^{14} (в формате int16). Входные сигналы сдвинуты друг относительно друга на $2\pi/7$ рад, что позволяет учесть и ситуации, когда сигналы на входе имеют различные значения, и ситуации, когда их значения совпадают. Сигналы Xs1-Xs7 и Out ЭВСМ1 объединены в шину и подключены к первому входу виртуального осциллографа Осц1. Сигналы Xs1-Xs7 и Out ЭВСМ2 объединены в шину и подключены ко второму входу виртуального осциллографа Осц1. Результаты имитационного моделирования приведены на рис. 4.

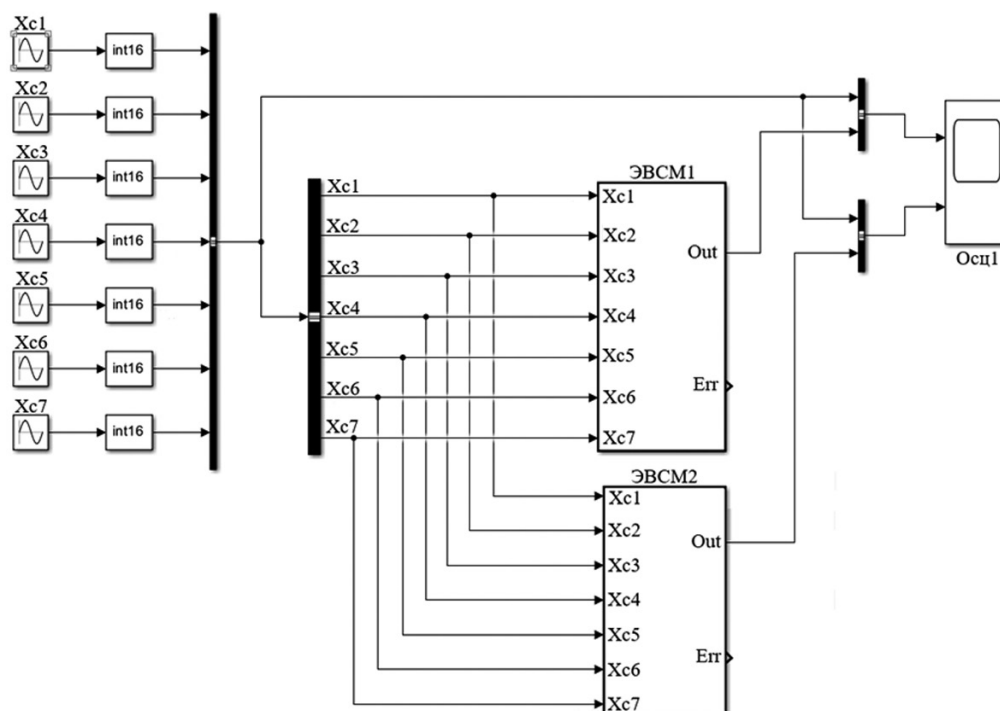


Рис. 3. Имитационная модель 7-канальных элементов выбора медианного сигнала с функцией исключения неиспользуемых входов (ЭВСМ1) и без нее (ЭВСМ2), реализованная в среде Matlab Simulink

Fig. 3. Simulation model of 7-channel median signal selection elements with the function of unused input exception (ЭВСМ1) and without it (ЭВСМ2) implemented in Matlab Simulink

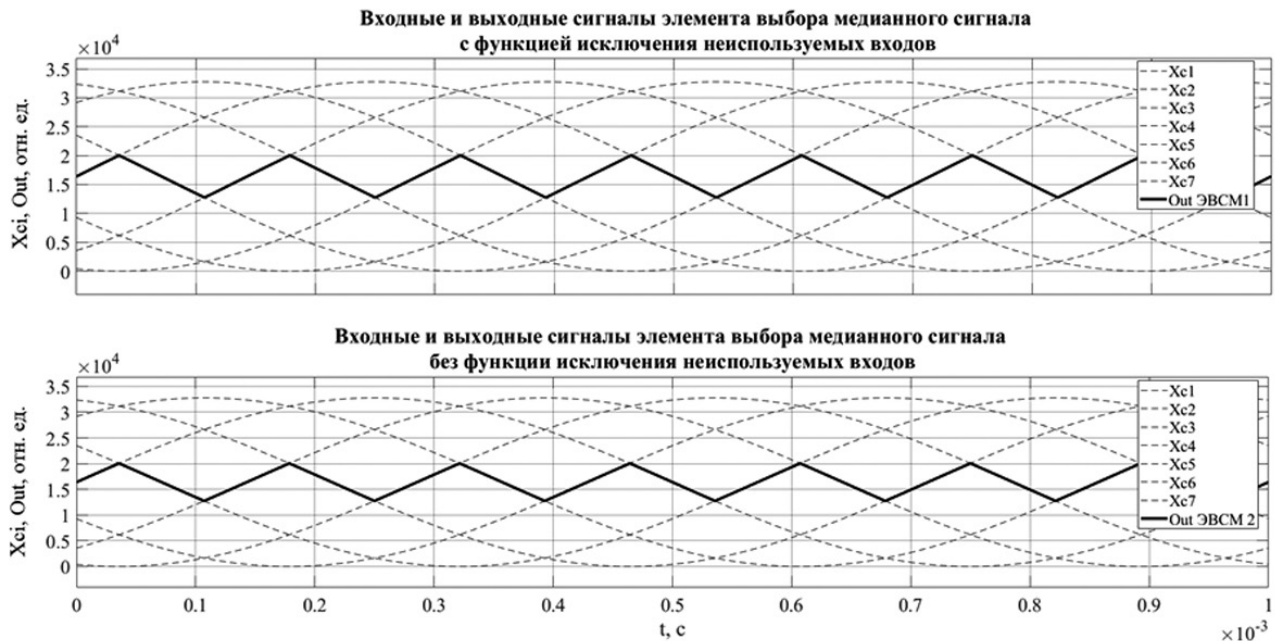


Рис. 4. Диаграммы входных и выходных сигналов 7-канальных элементов выбора медианного сигнала с функцией исключения неиспользуемых входов (ЭВСМ1, верхняя диаграмма) и без нее (ЭВСМ2, нижняя диаграмма); входные сигналы $Xs1-XsN$ обозначены прерывистой линией, выходные сигналы Out выделены жирными линиями

Fig. 4. Input and output signal diagrams of 7-channel median signal selection elements with unused input exception function (ЭВСМ1, upper diagram) and without it (ЭВСМ2, lower diagram); dashed line indicates $Xs1-XsN$ input signals, bold lines indicate output signals

Результаты моделирования показывают, что оба элемента выбора корректно определяют медианный сигнал из семи входных сигналов, когда все входы элементов выбора используются (на все входы подается сигнал, имеющий положительную величину).

Для исследования работы элементов выбора в случае отказа нескольких модулей в составе системы, в момент отказа (через 0,2 мс после начала моделирования) на соответствующий вход элементов выбора ЭВСМ1 и ЭВСМ2 подавался сигнал со значением, равным -1. С помощью подачи такого значения на вход элемента выбора система сообщает ему, что данный вход не используется по причине отказа соответствующего модуля, его перевода в режим ненагруженного резервирования, принудительного отключения или по другим причинам.

На рис. 5 представлены результаты имитационного моделирования элементов выбора медианного сигнала в случае отказа трех модулей (модули 3, 5 и 7, которым соответствуют входные сигналы модулей $Xs3$, $Xs5$, $Xs7$) в момент времени 0,2 мс.

Результаты имитационного моделирования показывают, что в случае отказа трех модулей из семи (менее половины от обще-

го числа модулей в составе системы) оба элемента выбора сохраняют работоспособность, однако выдают разные сигналы. Это связано с тем, что алгоритм работы модуля ЭВСМ2 не исключает из выборки сигналы, поступающие на неиспользуемые входы, из-за чего он продолжает передавать на выход медианный сигнал из всех 7 входных сигналов, включая сигналы, значение которых равно -1. В то же время элемент ЭВСМ1 выдает медианный сигнал из четырех оставшихся используемых входных сигналов, без учета в выборке сигналов на неиспользуемых входах. В данном случае оба элемента выбора позволят СЭП, использующим их, продолжать работу после отказа трех модулей в их составе.

На рис. 6 представлены результаты имитационного моделирования элементов выбора медианного сигнала в случае отказа четырех модулей (модули 3, 5, 6 и 7, которым соответствуют входные сигналы модулей $Xs3$, $Xs5$, $Xs6$ и $Xs7$) в момент времени 0,2 мс.

Результаты имитационного моделирования показывают, что в случае отказа четырех модулей из семи (более половины от общего числа модулей в составе системы) элемент

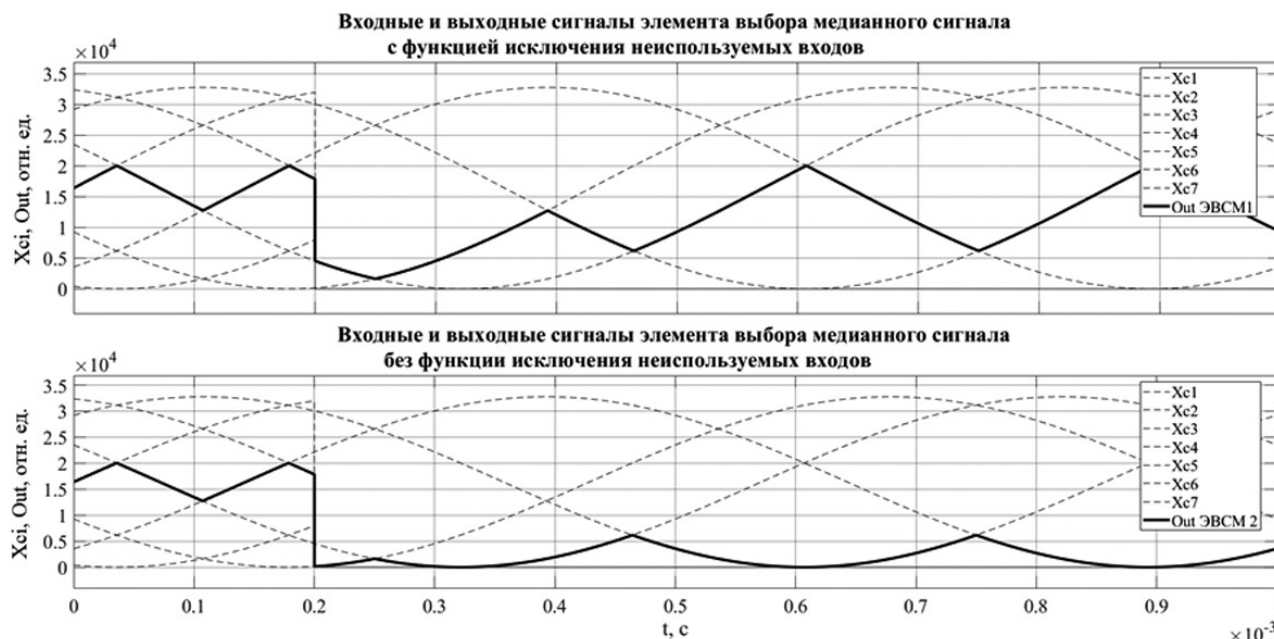


Рис. 5. Диаграммы входных и выходных сигналов 7-канальных элементов выбора медианного сигнала с функцией исключения неиспользуемых входов (ЭВСМ1, верхняя диаграмма) и без нее (ЭВСМ2, нижняя диаграмма) в случае отказа 3 модулей из 7 (входные сигналы X_{s1} - X_{sN} обозначены прерывистой линией, выходные сигналы Out выделены жирными линиями)

Fig. 5. Input and output signal diagrams of 7-channel median signal selection elements with unused input exception function (ЭВСМ1, upper diagram) and without it (ЭВСМ2, lower diagram) in case of failure of 3 modules out of 7 (dashed line indicates X_{s1} - X_{sN} input signals, bold lines indicate Out output signals)

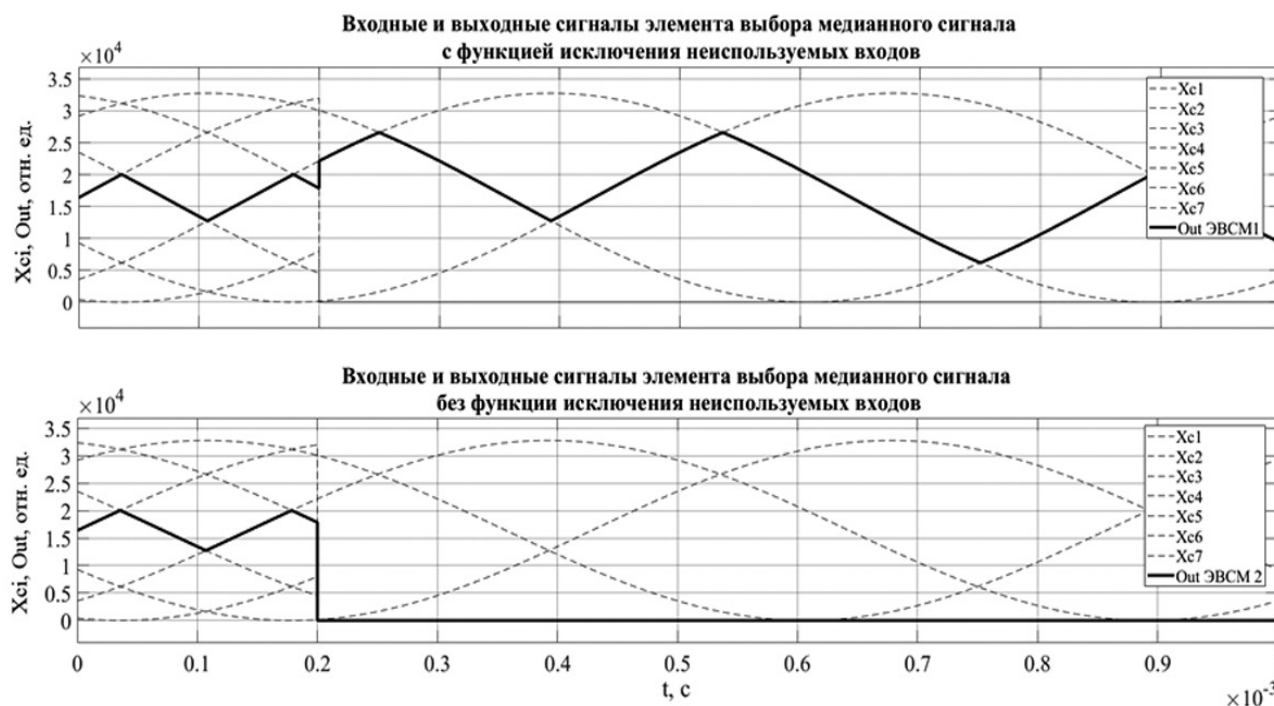


Рис. 6. Диаграммы входных и выходных сигналов 7-канальных элементов выбора медианного сигнала с функцией исключения неиспользуемых входов (ЭВСМ1, верхняя диаграмма) и без нее (ЭВСМ2, нижняя диаграмма) в случае отказа 4 модулей из 7 (входные сигналы X_{s1} - X_{sN} обозначены прерывистой линией, выходные сигналы Out выделены жирными линиями)

Fig. 6. Input and output signal diagrams of 7-channel median signal selection elements with unused input exception function (ЭВСМ1, upper diagram) and without it (ЭВСМ2, lower diagram) in case of failure of 4 modules out of 7 (dashed line indicates X_{s1} - X_{sN} input signals, bold lines indicate Out output signals)

выбора ЭВМС2 выдает на выход Out сигнал с одного из четырех неиспользуемых входов. Это связано с тем, что система сообщает элементу выбора, что входы не используются путем подачи на них сигнала со значением -1 в связи с тем, что в данном случае неиспользуемых входов четыре, в выборке из семи значений появляется четыре значения -1, и это значение является медианным среди всех семи. Наблюдаемая реакция элемента выбора полностью соответствует заявленному алгоритму его работы и иллюстрирует его недостаток, заключающийся в том, что его нельзя использовать для построения СЭП КА, рассчитанных на отказ более половины модулей МСН в ее составе.

В то же время элемент ЭВМС1 после отказа четырех модулей из семи продолжает передавать на выход медианный сигнал из трех оставшихся входных сигналов, что доказывает его способность обеспечивать работоспособность модульных СЭП КА при отказе более половины модулей.

На рис. 7 представлены результаты имитационного моделирования элементов выбора медианного сигнала в случае отказа шести модулей (все модули, кроме модуля

2, которому соответствует сигнал Xs2) в момент времени 0,2 мс.

Результаты имитационного моделирования, представленные на рис. 7, показывают, что элемент выбора ЭВМС1, построенный по структуре, представленной на рис. 2, передает на выход единственный из оставшихся используемых входных сигналов при отказе шести модулей из семи ($N-1$ модулей из N). Это объясняется тем, что в выборке из одного сигнала этот сигнал и является медианным. Таким образом, элемент выбора по структуре, представленной на рис. 2, способен сохранять работоспособность модульных СЭП КА вплоть до отказа последнего модуля в их составе.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЭЛЕМЕНТА ВЫБОРА МЕДИАННОГО СИГНАЛА НА ПЛИС

Для проверки работоспособности разработанного элемента выбора медианного сигнала с функцией исключения неиспользуемых входов, его логическая схема по структуре, представленной на рис. 2, была реализована на ПЛИС Altera Cyclone IV EP4CE115F29C7. При разработке кода на

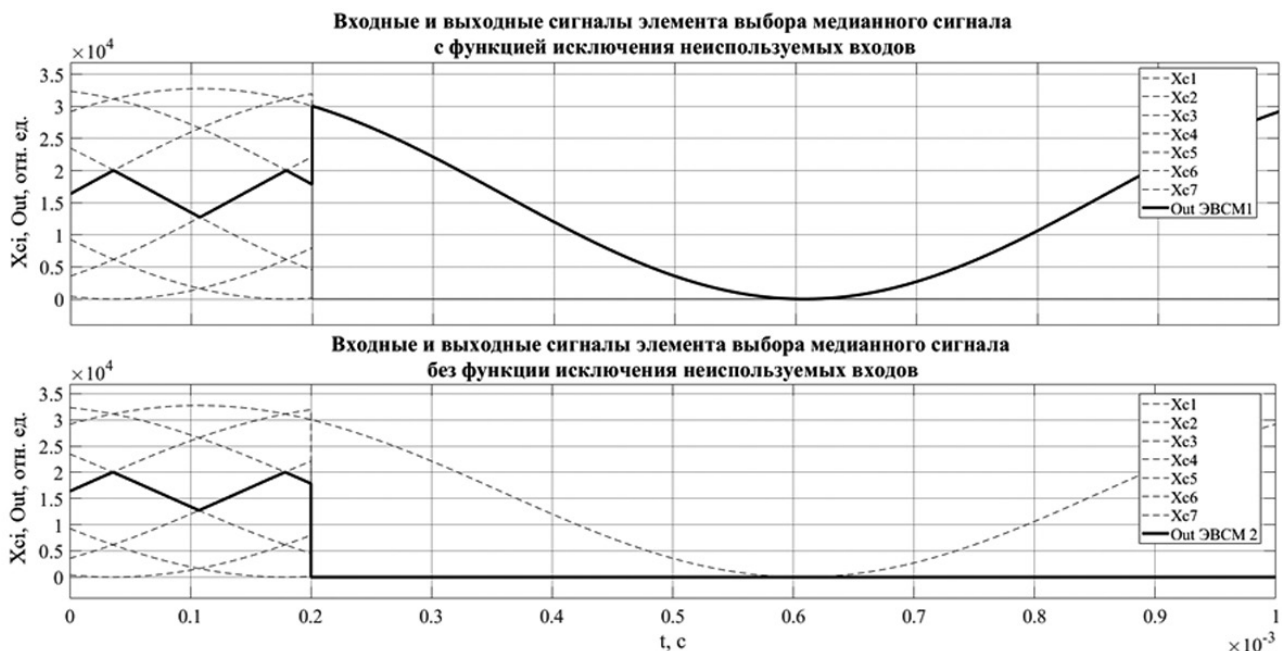


Рис. 7. Диаграммы входных и выходных сигналов 7-канальных элементов выбора медианного сигнала с функцией исключения неиспользуемых входов (ЭВМС1, верхняя диаграмма) и без нее (ЭВМС2, нижняя диаграмма) в случае отказа 6 модулей из 7 (входные сигналы Xs1-XsN обозначены прерывистой линией, выходные сигналы Out выделены жирными линиями)

Fig. 7. Input and output signal diagrams of 7-channel median signal selection elements with unused input exception function (ЭВМС1, upper diagram) and without it (ЭВМС2, lower diagram) in case of failure of 6 modules out of 7 (dashed line indicates Xs1-XsN input signals, bold lines indicate Out output signals)

языке описания аппаратуры Verilog HDL для ПЛИС был использован модельно-ориентированный подход (МОП), одним из важнейших аспектов которого является применение инструментов автоматической генерации кода на основе модели разрабатываемой системы [20].

Применение МОП позволило использовать описанную выше имитационную модель элемента выбора медианного сигнала с функцией исключения неиспользуемых входов (ЭВМС1 на рис. 3) для автоматической генерации кода для ПЛИС Altera Cyclone IV EP4CE115F29C7 [21]. Таким образом, на основе рассмотренной модели был получен IP-блок 7-канального элемента выбора медианного сигнала с функцией исключения неиспользуемых входов, занимающий 541 логическую ячейку ПЛИС. Таким образом, новый элемент выбора занимает в ПЛИС больше логических ячеек, чем реализация на ПЛИС аналога, описанного в [19], что обусловлено добавлением в структуру элемента нового блока исключения неиспользуемых входов. Однако, по сравнению с количеством доступных логических ячеек в современных ПЛИС, этот рост является незначительным. Кроме того, учитывая то, что (независимо от количества каналов N элемента выбора) для его работы требуется только один такой блок, и количество требуемых для его реализации

логических ячеек зависит от N линейно, данный элемент выбора, рассчитанный на большое количество каналов (25 и более) может быть реализован на современных ПЛИС.

Тестирование и отладка разработанного IP-блока проводились в среде Matlab Simulink с помощью технологии совместного моделирования FPGA (от англ. Field-Programmable Gate Array) in the loop (FIL, ПЛИС в контуре). Суть такой проверки заключается в том, что входными сигналами для IP-блока элемента выбора, загруженного на ПЛИС Altera Cyclone IV, являлись сигналы, сгенерированные в среде Simulink [22]. Результаты работы IP-блока передавались обратно в среду Simulink для их дальнейшей визуализации и обработки. Достоинством такого способа тестирования IP-блоков является отсутствие необходимости подготовки внешней схемы для проверки работоспособности блока. Проверка может производиться с помощью тех же имитационных моделей входных воздействий, которые использовались при разработке и тестировании имитационной модели самого элемента. На рис. 8 представлен внешний вид модели FIL.

На рис. 9 приведены диаграммы работы 7-канального элемента выбора медианного сигнала с функцией исключения неиспользуемых входов, реализованного на ПЛИС, при отказе четырех модулей из семи.

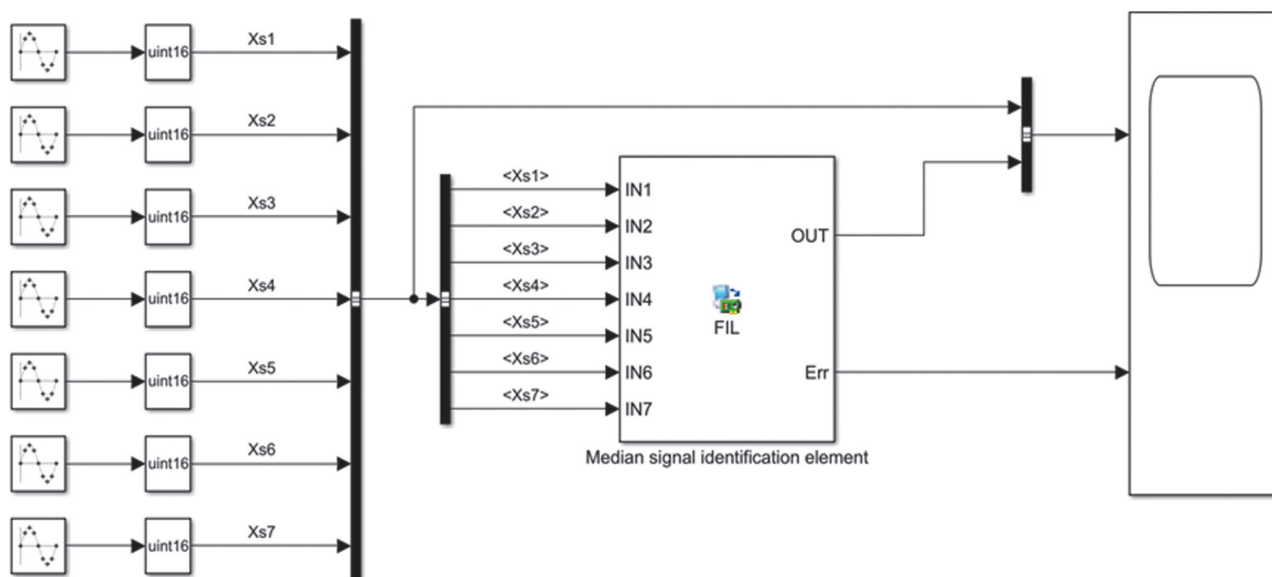


Рис. 8. Имитационная модель Matlab Simulink для совместного моделирования FPGA in the loop 7-канального элемента выбора медианного сигнала с исключением неиспользуемых входов на ПЛИС Altera Cyclone IV EP4CE115F29C7

Fig. 8. Matlab Simulink simulation model for FPGA in the loop concurrent simulation of a 7-channel selection element of a median signal with unused input exception on the programmable logic integrated circuit Altera Cyclone IV EP4CE115F29C7

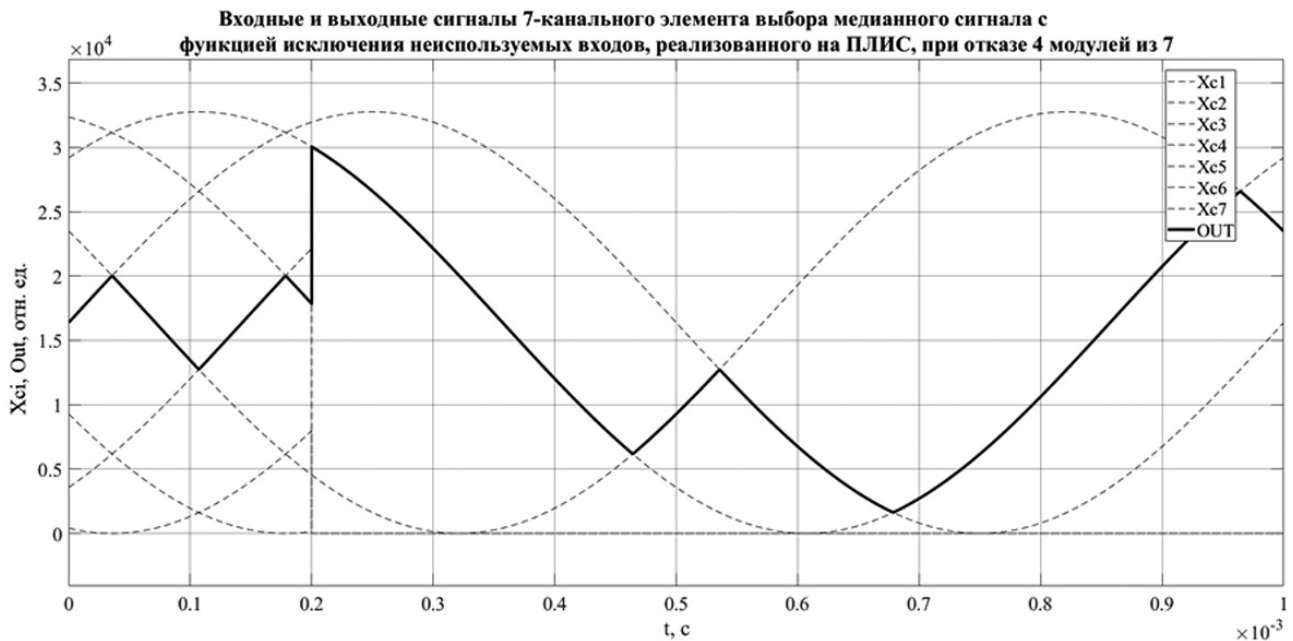


Рис. 9. Диаграммы работы 7-канального элемента выбора медианного сигнала с функцией исключения неиспользуемых входов, реализованного на ПЛИС Altera Cyclone IV EP4CE115F29C7, при отказе 4 модулей из 7

Fig. 9. Operation diagrams of a 7-channel median signal selection element with unused input exception function implemented on the programmable logic integrated circuit Altera Cyclone IV EP4CE115F29C7 FPGA for the case when 4 modules out of 7 fail

Диаграммы, приведенные на рис. 9, показывают, что работа предложенного элемента выбора на ПЛИС полностью соответствует описанному выше алгоритму. Данный элемент выбора обеспечивает определение медианного сигнала среди сигналов на используемых входах, даже если используется только один вход из N , что позволяет использовать предложенный элемент для разработки СЭП КА, к которым предъявляются повышенные требования по живучести.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная авторами и представленная в статье структура N -канального элемента выбора медианного сигнала с функцией исключения неиспользуемых входов может быть применена при построении высоконадежных резервированных СЭП КА с повышенными требованиями к живучести. Такой элемент выбора, в отличие от существующих аналогов, позволяет создать СЭП КА на базе унифицированных модулей стабилизации напряжения, способную сохранять работоспособность при отказе до последнего модуля в ее составе. Кроме того, на базе одного и того же N -канального элемента выбора с функцией исключения неиспользуемых входов, созданного по предложенной в данной

статье структуре, могут быть построены универсальные СЭП, рассчитанные на любое количество подключенных модулей от 1 до N без необходимости изменения конфигурации СЭП и самого элемента выбора при изменении количества модулей. Это достигается за счет того, что при отключении модуля от СЭП система автоматически понимает, что данный модуль отключен (по отсутствию данных, передаваемых этим модулем), и передает элементам выбора всех остальных модулей на соответствующий канал сигнал (имеющий значение -1), информирующий о том, что данный канал не используется.

Имитационное моделирование предложенного элемента выбора медианного сигнала с функцией исключения неиспользуемых входов подтвердило способность предложенной структуры выполнять заявленные в статье функции. Кроме того, в ходе имитационного моделирования были показаны преимущества предложенного элемента по сравнению с существующим аналогом, не имеющим функции исключения неиспользуемых входов. Было показано, что использование предложенного элемента выбора позволяет создавать модульные системы, сохраняющие работоспособность вплоть до отказа последнего модуля. Экспериментальное исследова-

ние разработанного с применением модельно-ориентированного подхода IP-блока предложенного элемента выбора медианного для

ПЛИС Altera Cyclone IV EP4CE115F29C7 показало полное соответствие данного IP-блока его заявленной логике работы.

Список источников

1. Пат. № 2248041, Российская Федерация, G 06 G 7/25. Ранговый селектор / Д.В. Андреев; заявитель и патентообладатель Ульяновский государственный технический университет. № 2003133024/09. Заявл. 11.11.2003; опубл. 10.03.2005. Бюл. № 7.
2. Marcuccio S., Ullo S., Carminati M., Kanoun O. Smaller satellites, larger constellations: trends and design issues for earth observation systems // IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. 2019. Vol. 34. Iss. 10. P. 50–59. <https://doi.org/10.1109/MAES.2019.2928612>.
3. Roberts T.G., Kaplan S. Space launch to low earth orbit: how much does it cost // Data repository, Center for Strategic and International Studies. 2022. Режим доступа: <https://aerospace.csis.org/data/space-launch-to-low-earth-orbit-how-much-does-it-cost/> (дата обращения: 29.09.2024).
4. McDowell J.C. The low earth orbit satellite population and impacts of the SpaceX Starlink constellation // The Astrophysical Journal Letters. 2020. Vol. 892. No. 2. P. L36. <https://doi.org/10.3847/2041-8213/ab8016>.
5. Henri Y. The OneWeb satellite system // Handbook of Small Satellites. Cham: Springer, 2020. P. 1091–1100. https://doi.org/10.1007/978-3-030-20707-6_67-1.
6. Osoro O.B., Oughton E.J., Wilson A.R., Rao A. Sustainability assessment of low earth orbit (LEO) satellite broadband mega-constellations. 2023. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3325730/v1>.
7. Shaengchart Ya., Kraivanit T. The SpaceX Starlink satellite project: business strategies and perspectives // Corporate & Business Strategy Review. 2024. Vol. 5. Iss. 1. P. 30–37. <https://doi.org/10.22495/cbsrv5i1art3>.
8. Zhu Hong-yu, Bo-wen Zhang, Donglai Zhang. Overview of architectures for satellite's regulated bus power system // IEEE 1st China International Youth Conference on Electrical Engineering. 2020. <https://doi.org/10.1109/CIECEE49808.2020.9332665>.
9. Апасов В.И. Унифицированный модуль системы электропитания малого космического аппарата // Решетневские чтения. 2016. Т. 1. С. 322–324. EDN: XEAFDJ.
10. Antuna A.L., Arias M., Miaja P.F., Villarejo J.A., Oliveira T.H., Fernández A. Modular converters analysis and design for the standardization of the power bus in satellites // 13th European Space Power Conference. 2023. <https://doi.org/10.1109/ESPC59009.2023.10298162>.
11. Апасов В.И. Исследование унифицированного силового модуля на основе комбинированного преобразователя напряжения // Сибирский журнал науки и технологий. 2016. Т. 17. № 4. С. 916–922.
12. Manoj K.M.B., Padmavathi K. Design and implementation of low power multi-output flyback converter for nano-satellite applications // First International Conference on Advances in Electrical, Electronics and Computational Intelligence. 2023. <https://doi.org/10.1109/ICAEECI58247.2023.10370982>.
13. Soubrier L., Trehet E. High power PCU for alphabus: PSR100V // 9th European Space Power Conference. 2011. Vol. 690.
14. Оскирко В.О., Сочугов Н.С., Павлов А.П. Модульный биполярный источник питания для мощных ионно-плазменных установок // Приборы и техника эксперимента. 2014. № 5. С. 85. <https://doi.org/10.7868/S0032816214050127>. EDN: SKIAPX.
15. Kabirov V.A., Semenov V.D., Torgaeva D.S., Otto A.I. Miniaturization of spacecraft electrical power systems with solar-hydrogen power supply system // International Journal of Hydrogen Energy. 2023. Vol. 48. Iss. 24. P. 9057–9070. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.12.087>.
16. Konstantinou G., Pou J., Ceballos S., Agelidis V.G. Active redundant submodule configuration in modular multilevel converters // IEEE transactions on power delivery. 2013. Vol. 28. Iss. 4. P. 2333–2341. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2013.2264950>.
17. Пат. № 2204164, Российская Федерация, C1 G06G 7/25. Медианный идентификатор / Д.В. Андреев; заявитель Ульяновский государственный технический университет. № 2002110479/09. Заявл. 19.04.2002; опубл. 10.05.2003. Бюл. № 13.
18. Пат. № 2172516, Российская Федерация, C1 G06G 7/52. Ранговый фильтр / Д.В. Андреев; заявитель Ульяновский государственный технический университет. № 2000111009/09. Заявл. 28.04.2000; опубл. 20.08.2001. Бюл. № 23.
19. Пат. № 2804599, Российская Федерация, C1 G06G 7/25, H03H 17/02. Многоканальный элемент выбора одного из входных сигналов / В.А. Кабиров, К.А. Ахтырский, В.Д. Семенов, Д.С. Торгаева; заявитель Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. № 2023102996. Заявл. 10.02.2023; опубл. 02.10.2023. Бюл. № 28.
20. Mudhivartha B.R., Saini V., Dodia A., Shah P., Sekhar R. Model based design in automotive open system architecture // 7th International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (Madurai, 17–19 May 2023). Madurai: IEEE, 2023. P. 1211–1216. <https://doi.org/10.1109/ICICCS56967.2023.10142603>.
21. Elsayed G., Kayed S.I. A comparative study between MATLAB HDL Coder and VHDL for FPGAs design and implementation // Journal of International Society for Science and Engineering. 2022. Vol. 4. Iss. 4. P. 92–98. <https://doi.org/10.21608/jisse.2022.136645.1056>.

22. Pereira L.F.S.C, Batista E.A., Pinto J.O.P., Upadhyaya B.R., Hines J.W., Coble J.B. Model predictive control for sodium fast reactors based on Laguerre functions and FPGA-in-the-loop environment // *Nuclear Engineering and Design*. 2022. Vol. 400. P. 112041. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2022.112041>.

References

1. Andreev D.V. *Rank selector*. Patent RF, no. 2248041; 2005. (In Russ.).
2. Marcuccio S., Ullo S., Carminati M., Kanoun O. Smaller satellites, larger constellations: trends and design issues for earth observation systems. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*. 2019;34(10):50-59. <https://doi.org/10.1109/MAES.2019.2928612>.
3. Roberts T.G., Kaplan S. Space launch to low earth orbit: how much does it cost. *Data repository, Center for Strategic and International Studies*. 2022. Available from: <https://aerospace.csis.org/data/space-launch-to-low-earth-orbit-how-much-does-it-cost/> [Accessed 29th September 2024].
4. McDowell J.C. The low earth orbit satellite population and impacts of the SpaceX Starlink constellation. *The Astrophysical Journal Letters*. 2020;892(2):L36. <https://doi.org/10.3847/2041-8213/ab8016>.
5. Henri Y. The OneWeb satellite system. In: *Handbook of Small Satellites*. Cham: Springer; 2020, p. 1091-1100. https://doi.org/10.1007/978-3-030-20707-6_67-1.
6. Osoro O.B., Oughton E.J., Wilson A.R., Rao A. Sustainability assessment of low earth orbit (LEO) satellite broadband mega-constellations. 2023. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3325730/v1>.
7. Shaengchart Ya., Kraiwanit T. The SpaceX Starlink satellite project: business strategies and perspectives. *Corporate & Business Strategy Review*. 2024;5(1):30-37. <https://doi.org/10.22495/cbsrv5i1art3>.
8. Zhu Hong-yu, Bo-wen Zhang, Donglai Zhang. Overview of architectures for satellite's regulated bus power system. In: *IEEE 1st China International Youth Conference on Electrical Engineering*. 2020. <https://doi.org/10.1109/CYCEE49808.2020.9332665>.
9. Apasov V.I. Unified system power module of small spacecraft. *Reshetnevskie chteniya*. 2016;1:322-324. (In Russ.). EDN: XEAFDJ.
10. Antuna A.L., Arias M., Miaja P.F., Villarejo J.A., Oliveira T.H., Fernández A. Modular converters analysis and design for the standardization of the power bus in satellites. In: *13th European Space Power Conference*. 2023. <https://doi.org/10.1109/ESPC59009.2023.10298162>.
11. Apasov V.I. Study of unified power unit based on combined voltage converter. *Vestnik of SibGAU*. 2016;17(4):916-922. (In Russ.).
12. Manoj K.M.B., Padmavathi K. Design and implementation of low power multi-output flyback converter for nano-satellite applications. In: *First International Conference on Advances in Electrical, Electronics and Computational Intelligence*. 2023. <https://doi.org/10.1109/ICAEECI58247.2023.10370982>.
13. Soubrier L., Trehet E. High power PCU for alphasat: PSR100V. In: *9th European Space Power Conference*. 2011;690.
14. Oskirko V.O., Sochugov N.S., Pavlov A.P. A modular bipolar power supply for high-power ion-plasma installations. *Pribory i tekhnika eksperimenta*. 2014;5:85. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0032816214050127>. EDN: SKIAPX.
15. Kabirov V.A., Semenov V.D., Torgaeva D.S., Otto A.I. Miniaturization of spacecraft electrical power systems with solar-hydrogen power supply system. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023;48(24):9057-9070. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.12.087>.
16. Konstantinou G., Pou J., Ceballos S., Agelidis V.G. Active redundant submodule configuration in modular multilevel converters. *IEEE transactions on power delivery*. 2013;28(4):2333-2341. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2013.2264950>.
17. Andreev D.V. *Median identifier*. Patent RF, no. 2204164; 2003. (In Russ.).
18. Andreev D.V. *Rank filter*. Patent RF, no. 2172516; 2001. (In Russ.).
19. Kabirov V.A., Akhtyrskiy K.A., Semenov V.D., Torgaeva D.S. *Multichannel element for selecting one of the input signals*. Patent RF, no. 2804599; 2003. (In Russ.).
20. Mudhivarthi B.R., Saini V., Dodia A., Shah P., Sekhar R. Model based design in automotive open system architecture. In: *7th International Conference on Intelligent Computing and Control Systems*. 17–19 May 2023, Madurai. Madurai: IEEE; 2023, p. 1211–1216. <https://doi.org/10.1109/ICICCS56967.2023.10142603>.
21. Elsayed G., Kayed S.I. A comparative study between MATLAB HDL Coder and VHDL for FPGAs design and implementation. *Journal of International Society for Science and Engineering*. 2022;4(4):92-98. <https://doi.org/10.21608/jisse.2022.136645.1056>.
22. Pereira L.F.S.C, Batista E.A., Pinto J.O.P., Upadhyaya B.R., Hines J.W., Coble J.B. Model predictive control for sodium fast reactors based on Laguerre functions and FPGA-in-the-loop environment. *Nuclear Engineering and Design*. 2022;400:112041. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2022.112041>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ахтырский Кирилл Александрович,
аспирант,
Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kirill A. Akhtyrskiy,
Postgraduate,
Tomsk State University of Control Systems
and Radioelectronics,
40, prospect Lenina, Tomsk 634050, Russia

✉ k.akhtirsky@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0001-1829-7282>

Кабилов Вагиз Александрович,
к.т.н.,
ассистент отделения электроэнергетики
и электротехники,
Томский политехнический университет,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, Россия
kva@vipelec.com

Семенов Валерий Дмитриевич,
к.т.н., старший научный сотрудник,
профессор кафедры промышленной электроники,
Томский государственный университет систем
управления и радиоэлектроники,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, Россия
svd@ie.tusur.ru

Торгаева Дарья Сергеевна,
к.т.н.,
ведущий инженер-программист,
Акционерное общество «Научно-производственная
фирма «Микран»,
634041, г. Томск, пр. Кирова, 51, Россия
belial1349@mail.ru

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 07.11.2024 г.; одобрена после рецензирования 30.11.2024 г.; принята к публикации 02.12.2024 г.

✉ k.akhtirsky@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0001-1829-7282>

Vagiz A. Kabirov,
Cand. Sci. (Eng.),
Assistant of the Department of Electric Power
and Electrical Engineering,
Tomsk Polytechnic University,
30, prospect Lenina, Tomsk 634050, Russia
kva@vipelec.com

Valeriy D. Semenov,
Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher,
Professor of the Department of Industrial Electronics,
Tomsk State University of Control Systems and
Radioelectronics,
40, prospect Lenina, Tomsk 634050, Russia
svd@ie.tusur.ru

Darya S. Torgaeva,
Cand. Sci. (Eng.),
Lead Software Engineer,
Research and Production company Micran
Joint Stock Company,
51, prospect Kirova, Tomsk 634041, Russia
belial1349@mail.ru

Authors' contribution

The authors contributed equally to the article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 07.11.2024; approved after reviewing 30.11.2024; accepted for publication 02.12.2024.