

## Исследование интегрированных схем изолирования аналого-цифровых преобразователей

**Глазунов Андрей Николаевич**

студент, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, г. Калининград, Россия, старший инженер отдела эксплуатации сети Филиала ПАО «МТС» в Калининградской области, glazunov.andrej@mail.ru

**Ефимов Александр Андреевич**

студент, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, г. Калининград, Россия, efimov\_alex99@mail.ru

### АННОТАЦИЯ

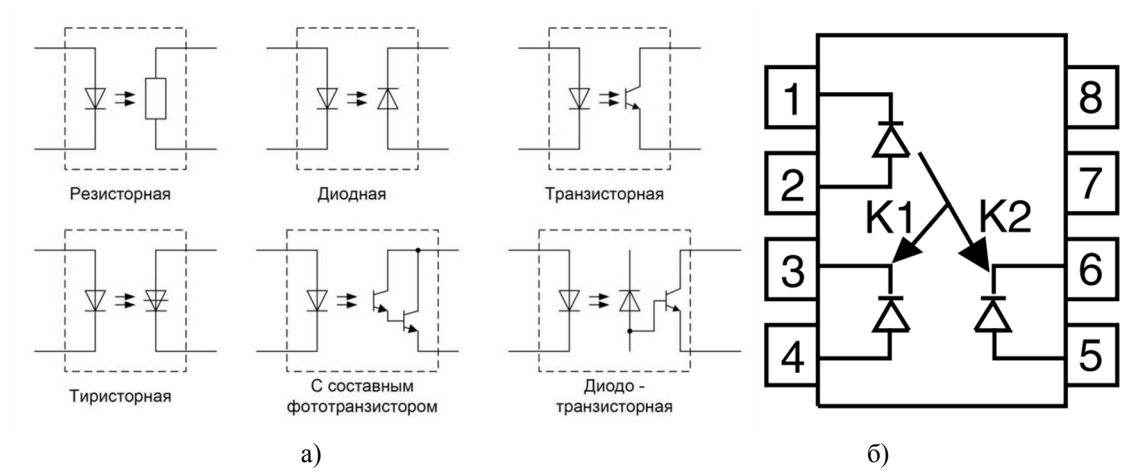
**Введение:** Современные устройства, содержащие преобразователи, komponуются со множеством других устройств, создающих помехи для работы аналого-цифровых преобразователей (АЦП), что сказывается на качестве, в частности, битности оцифрованного сигнала. **Постановка задачи:** в связи с этим для обеспечения электромагнитной совместимости в схемотехнике используется изолирование различных блоков устройства, которое помогает избежать влияния помех одного блока на другие блоки. Предметом исследования являются изоляторы АЦП. Целью работы является поиск оптимальных схемотехнических решений для изолирования современных АЦП имеющих встроенные блоки компараторов. **Методы:** методология исследования основана на сравнении допустимых уровней работы компараторов для различных типов изолирования. Рассмотрены два вида изолирующих устройств по физическому принципу: оптические и магнитные. С точки зрения типа обрабатываемого сигнала исследованы аналоговые и цифровые изолирующие устройства. **Результаты:** на основании проведенного аналитического обзора предложены способы изоляции последовательных и параллельных АЦП с учетом их технических характеристик. Особое внимание уделено параллельному АЦП со встроенным компаратором. Сущность такого параллельного АЦП заключается в том, что излучатель и приемник изолятора совмещаются с компаратором параллельного АЦП. Рассмотрены и проанализированы варианты схемы с оптоизолятором, магнитоизолятором и интегрированной лучевой трубкой. **Практическая значимость:** предложены схемотехнические решения, исследованы допустимые уровни работы компараторов. Показано, что использование АЦП с интегрированной изоляцией может находить широкое применение при оцифровке сигналов для разных приложений, в основном в промышленных установках. **Обсуждение:** в дальнейшем технологии интеграции оптических изоляторов могут быть применены при создании квантовых процессоров и систем искусственного интеллекта.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** изолятор; АЦП; магнитоизолятор; оптоизолятор; гальваническая связь; входное напряжение; интеграция.

**Введение**

В системах управления внешние аналоговые сигналы должны быть преобразованы в цифровые сигналы. При дискретизации внешних входных аналоговых сигналов, таких как напряжение или ток, необходимо обеспечить небольшое усиление аналогового сигнала или значительное уменьшение сигнала до цифрового сигнала, который может быть дискретизирован обычным образом с помощью АЦП [1, 2]. Обеспечение точности формирования сигнала выдвигает строгие требования к конструкции самой схемы, например, при усилении или уменьшении аналогового сигнала, используя операционный усилитель, возникает необходимость обработки и компенсации собственных характеристик операционного усилителя (таких как напряжение смещения, ток смещения и другие параметры) в сигнале [3, 4]. Сложность внешней среды ввода также требует, чтобы схема формирования сигнала обладала высокой помехозащищенностью [5, 6]. Решить данную задачу возможно с использованием изоляторов. Помимо основной задачи изоляторы позволяет выполнять дополнительные функции, такие как управление током смещения, преобразование уровней логических сигналов или их усиление [7]. В схемотехнике наиболее распространенными методами изолирования являются оптический и магнитный.

**Оптические изоляторы** чаще всего представляются оптопарой, которая может иметь различную конфигурацию и состоять из разных элементов (рис. 1,а). Так, в основе устройства лежит приемник и передатчик. Передатчиком может выступать светодиод, а приемником обычно выступают: фоторезистор, фотодиод, фототранзистор. Соответственно, классификация этих устройств происходит по принимающей стороне, т.е. по типу выхода.



**Рис. 1.** а) Типичные схемы оптопар (оптоизоляторов); б) оптоизолятор с двумя выводами.

По конфигурации можно выделить изоляторы с одним, наиболее распространенные, и множественными выходами, которые являются менее популярными и дорогостоящими (рис. 1,б) [8, 9].

**Магнитоизоляторы** становятся наиболее популярными в последнее время за счет возможности разместить в корпусе микросхем индуктивные элементы, работающие по принципу обычного трансформатора или гигантского магниторезистивного эффекта. По сравнению с оптическими изоляторами они потребляют меньшую мощность [10].

Сами изоляторы бывают цифровыми и аналоговыми. Цифровые применяются для развязки цифровых входных и выходных сигналов АЦП, например, сигналов синхронизации (тактовых) и сигналов, поступающих с последовательного интерфейса. Их графическое обозначение представлено на рис. 2,а. Вариант исполнения связанных индуктивностей приведен на рис. 2,б. Они могут обеспечить однонаправленное или двунаправленное изолирование и при нормальной работе не оказывают влияния на коэффициент битовых ошибок. Аналоговые изоляторы обеспечивают изолирование от помех, поступающих от усилителей и других устройств предварительной обработки аналогового сигнала. При этом, как и любое устройство, работающее с аналоговым сигналом, изолятор может вносить помехи и производит модуляцию сигнала, из-за чего параметры сигнала строго ограничены характеристиками изолятора.

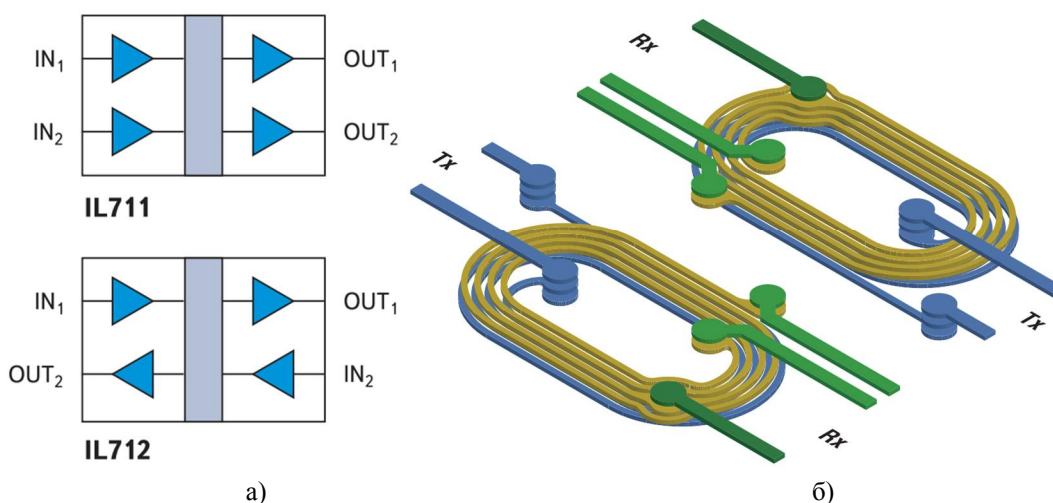


Рис. 2. а) Двухканальные цифровые магнитоизоляторы [10]; б) вариант исполнения связанных индуктивностей для цифрового магнитоизолятора [11].

Применение изолирующих устройств позволяет экономить на многослойности печатных плат и других элементах экранирования.

**Методы**

Используя цифровые и аналоговые изоляторы, можно добиться полного изолирования АЦП от помех, поступающих через проводящую среду по дорожкам и проводам, а это главным образом гальваническая связь. При этом емкостные, индуктивные и электромагнитные помехи, передающиеся по непроводящей среде, должны изолироваться другими способами, например экранированием. Принимая комплекс мер, одним из которых является изолирование помех, поступающих через проводящую среду, можно обеспечить наилучшую работу АЦП в различных температурных диапазонах и условиях неблагоприятной электромагнитной обстановки [12-14].

Современные устройства должны быть компактны и многофункциональны. Так, для последовательных АЦП подходят самые простые изоляторы, что нельзя сказать про параллельные АЦП, которым необходимо подавать сигнал на каждый компаратор (рис. 3) [15, 16].

Однако, если компараторы встроены в АЦП, то их конструкция должна учитывать следующие параметры: быстродействие, восстановление после различных уровней нагрузки, мощность рассеивания, напряжение и ток смещения, а также площадь кристалла, которую занимает выбранная архитектура. Существует ещё одна важная и очень неприятная особенность – компараторы могут вызывать различные ошибки в АЦП, которые необходимо учитывать и принимать должные меры. Данные ошибки получаются в виду невозможности компаратора разрешить небольшой дифференциал. Это явление известно как «метастабильность» - способность устройства балансировать на пороге (при маленьких значениях) в течении очень короткого времени [17, 18]. Проблема данного состояния показана на рис. 4.

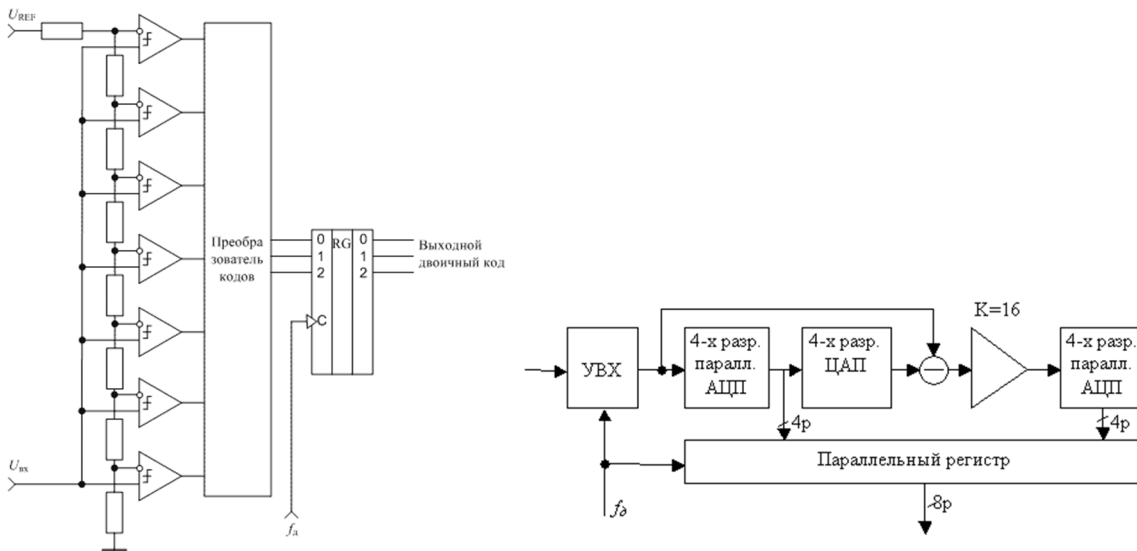


Рис 3. Схемы параллельных АЦП

На рис. 4 показаны три различных условия дифференциального входа напряжения: большое (1), малое (2) и нулевое (3) значения  $\Delta V_{IN}$ . Вход напряжения можно описать следующим уравнением:

$$V_0(t) = \Delta V_{IN} A e^{t/\tau}$$

где  $\Delta V_{IN}$  – дифференциальное входное напряжение в момент фиксации,  $A$  – коэффициент усиления предусилителя,  $\tau$  – постоянная времени обновления фиксации и  $t$  – время, прошедшее после фиксации выходного сигнала компаратора.

При использовании относительно небольших дифференциальных напряжений выходу требуется больше времени для достижения допустимого логического уровня. Если данные будут считываться при нахождении между областью «логическая единица» и «логический ноль», то данные могут быть ошибочными. Если дифференциальное входное напряжение равно нулю, а компаратор имеет идеальную балансировку во время фиксации, то в таком случае время необходимое для достижения логического уровня может быть теоретически бесконечным. Однако, в реальных условиях гистерезис, различные шумы и не идеальность оборудования делает подобное условие крайне маловероятным. Эффекты от недопустимых

логических уровней компаратора различны, в зависимости от того, как компаратор используется в составе АЦП [19, 20].

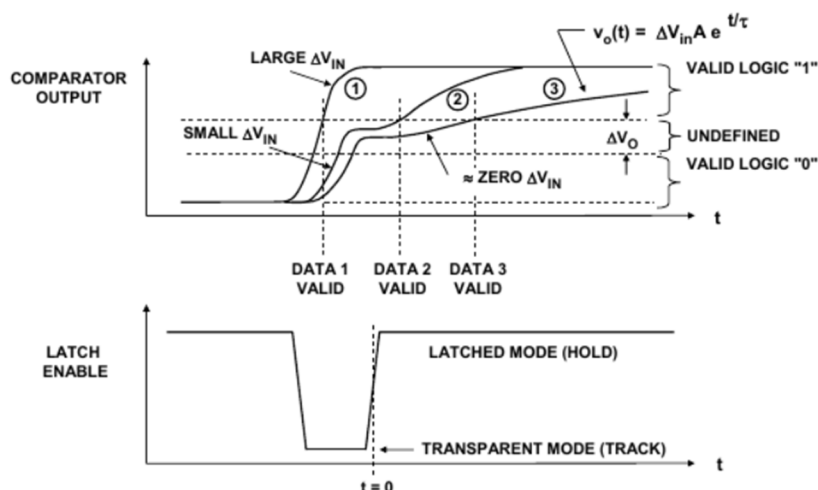


Рис. 4. Диаграммы «метастабильности» компаратора

### Результаты

При объединении устройств развязки и АЦП можно получить устройство невосприимчивое к помехам, поступающим по гальванической связи из цепи, к которой подключен АЦП. Причем совмещение может быть осуществлено не только в плане установки нескольких устройств в одно сложное устройство (микросхему), основанное на прежних принципах работы, но и основанное на изменении физических принципов работы устройства с заданными параметрами, что за счет уменьшения количества интерфейсов между блоками может увеличить быстродействие. Далее будет рассматриваться интеграция изолятора в параллельном АЦП.

Суть такого параллельного АЦП заключается в том, что излучатель и приемник изолятора могут быть совмещены с компаратором параллельного АЦП. Такая схема может быть выполнена, например, при помощи оптоизолятора, магнитоизолятора, лучевой трубки или других явлений позволяющих создать гальваническую развязку.

Схема работы АЦП с интегрированным оптоизолятором представлена на рис. 5. В отличие от типовой схемы выполняются следующие условия:

- Обеспечивает изолирование АЦП от помех, передающихся через гальваническую связь;
- На один из входов компараторов поступает одинаковый опорный сигнал (обеспечивается отсутствие дополнительных помех и погрешности оцифровки за счет отсутствия резисторов с погрешностью их сопротивления);
- На инвертируемый вход поступает измеряемый сигнал с различными амплитудами (что даже при высоковольтной помехе в аналоговом сигнале позволяет оцифровать его при значениях выборки большей, чем значение изменения амплитуды сигнала в соответствии с теоремой Котельникова);

- Аналоговый сигнал проходит незначительную обработку на входе, позволяющую обеспечить работу оптической развязки в линейном режиме;
- В качестве способа регулировки светового потока может использоваться затухание при прохождении через среду распространения, например затемненное стекло, в отличие от типовой схемы, где используется последовательность резисторов.

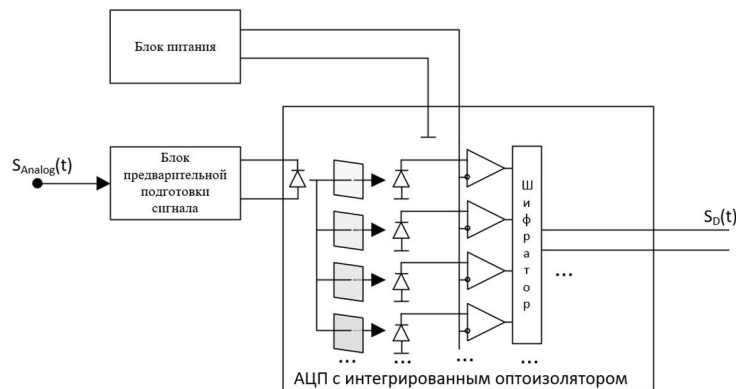


Рис. 5. Схема АЦП с интегрированным оптоизолятором.

Для реализации описанной схемы могут использоваться высоколинейные, широкополосные оптические изоляторы типа IL300-E (VISHAY).

Схема работы АЦП с интегрированным магнитоизолятором представлена на рис. 6,а. Со стороны вторичной обмотки могут быть расположены дополнительные элементы, например резисторы. На рис. 6,б схематично представлен один из ключевых элементов этой схемы, где в качестве связанных индуктивностей используется многообмоточный трансформатор.

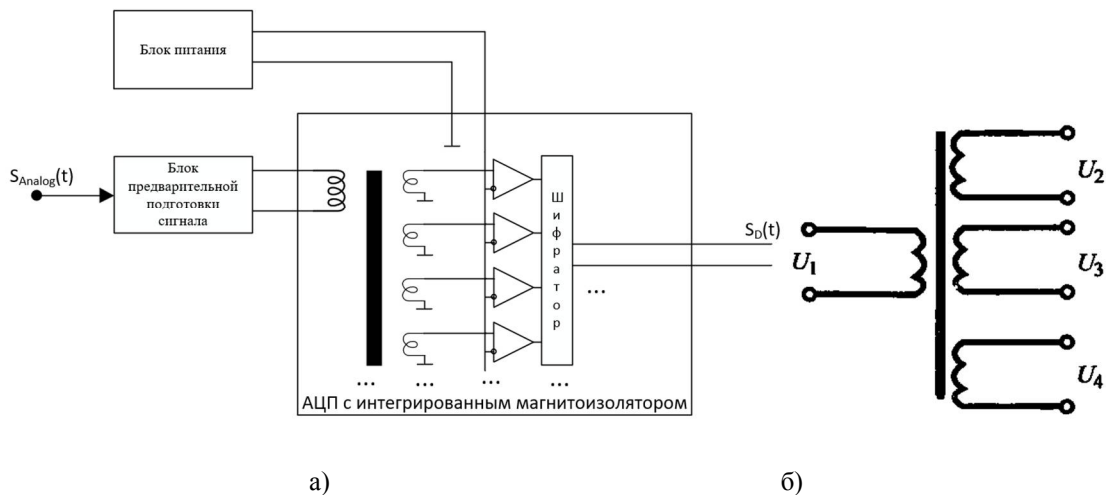


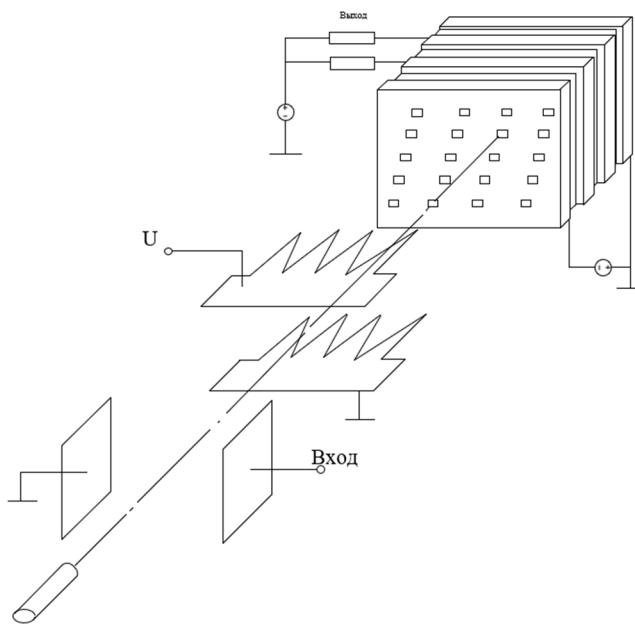
Рис. 6. а) Схема АЦП с интегрированным магнитоизолятором; б) многообмоточный трансформатор

Основные отличительные особенности схожи с АЦП с интегрированным оптоизолятором, но имеются некоторые отличия:

Изменение амплитуды происходит за счёт пространственного разнесения индуктивностей, неоднородности магнитопровода и разных параметров обмоток, при этом устойчивость к помехам будет меньше, чем при использовании оптикоизолятора, что обусловлено большим участком линейности индуктивной связи, где полупроводники уходят в область насыщения.

Работа АЦП с интегрированным магнитоизолятором будет менее высокоскоростной из-за сложности создания магнитных связей с малой индуктивностью.

Схема работы АЦП с интегрированной лучевой трубкой представлена на рис. 7.



**Рис. 7.** Схема АЦП с интегрированной лучевой трубкой

По сравнению с уже приведенными АЦП данное решение имеет следующие отличительные особенности:

- Относительно большие габариты устройства, что обусловлено необходимостью размещения компонентов устройства в вакуумном баллоне;
- Имеют невысокую точность, обычно до восьми двоичных разрядов, что не мешает их использовать в промышленности, но ограничивает их использование в высокотехнологичных устройствах;
- На выходе кодирующей электронно-лучевой трубки формируются кодовые импульсы, комбинация которых отображает мгновенное значение входного аналогового сигнала, что говорит о быстродействии данного устройства ( $10^{-9}$  с).

Для понимания важности изолирования АЦП от помех ниже приведена осциллограмма цифрового сигнала с использованием разных цифровых магнитоизоляторов [10] (рис. 8).

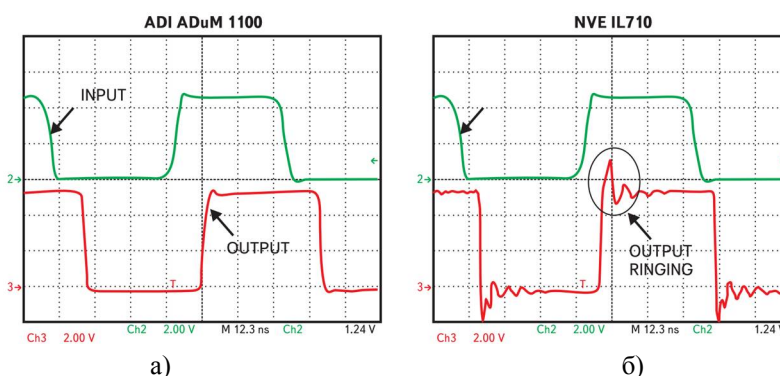


Рис. 8. Сравнение формы выходного сигнала магнитоизолятора: а) Analog Devices, б) NVE

**Заключение**

Таким образом, в данной статье были описаны общие принципы работы магнитоизоляторов, используемых для развязки цифровых и аналоговых сигналов. Также было проведено исследование допустимых уровней работы компараторов. Подводя итоги, можно сказать, что использование АЦП с интегрированной изоляцией может находить широкое применение при оцифровке сигналов для разных приложений, в основном в промышленных установках. При использовании изоляторов могут наблюдаться проблемы с синхронизацией, что обусловлено задержками, вносимыми интегрированными изоляторами. В дальнейшем технологии интеграции изоляторов, в частности оптических, могут быть применены при создании квантовых процессоров и будут способствовать развитию искусственного интеллекта, так как работа этих устройств происходит на высокой скорости и способна связать мир современной полупроводниковой электроники с миром квантовых вычислений.

**Литература**

1. Волик А. В. Цифровая обработка сигнала // Информационные технологии в науке и образовании. Проблемы и перспективы. 2022. С. 177-180.
2. Зайцев В. В. Физически обоснованная дискретизация времени в математических моделях генераторов регулярных и хаотических колебаний // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2019. Т. 22. № 3. С. 44-48.
3. Kwon Y., Kim H., Kim J., Han K., You D., Heo H., Cho D. D., Ko H. Fully differential chopper-stabilized multipath current-feedback instrumentation amplifier with R-2R DAC offset adjustment for resistive bridge sensors // Applied sciences. 2019. Т. 10. № 1. С. 63.
4. Svoboda M., Sotner R., Polak L. Practical aspects of impedance measurement using operational amplifier and oscilloscope // 2022 32nd International Conference Radioelektronika. IEEE, 2022. С. 01-04.
5. Тарасов В. В., Федотов Д. О., Ермаков А. К., Петров А. С. Анализ свойств помехозащищенности сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией и фазовой манипуляцией // Сборник докладов Третьей Всероссийской научной конференции “Радиотехнические, оптические и биотехнические системы. Устройства и методы обработки информации” (Санкт-Петербург, 14–22 апреля 2022 г.) Санкт-Петербург, 2022. С. 96-98.
6. Филатов В. И., Борукаева А. О., Бердюков П. Г. Способы повышения помехозащищенности в радиоканалах // Политехнический молодежный журнал. 2019. № 3. С. 4-4.
7. Bu Q., Wen H., Shi H., Hu Y., Yang Y. Universal transient dc-bias current suppression strategy in dual-active-bridge converters for energy storage systems // IEEE Transactions on Transportation Electrification. 2020. Т. 7. № 2. С. 509-526.
8. Kaczmarek M. Two Channels Opto-Isolation Circuit for Measurements of the Differential Voltage of Voltage Transformers and Dividers // Energies. 2022. Т. 15. № 7. С. 2694.



9. *Majareh S. H. L., Sedaghati F., Hosseinpour M., Mousavi-Aghdam S. R.* Design, analysis and implementation of a generalised topology for multilevel inverters with reduced circuit devices // *IET Power Electronics*. 2019. Т. 12. № 14. С. 3724-3731.
10. *Брайан Д.* Изолированные интерфейсы  $\mu$ Module от Linear Technology // *Компоненты и технологии*. 2017. № 10. С. 34-38.
11. *Рентюк В., Башмаков П.* Изоляторы  $\mu$ MODULE: высокоинтегрированные изолированные интерфейсы для ответственных применений от Linear Technology (LTC) // *Вестник электроники*. 2016. № 3(57).
12. *Ling Y.* Design and implementation of an analog signal isolation conditioning circuit // *Journal of Physics: Conference Series*. 2022. Т. 2338. № 1. С. 012071.
13. *Li C., Vankayalapati B. T., Akin B., Yu Zh.* Analysis and Compensation of Sigma-Delta ADC Latency for High Performance Motor Control and Diagnosis // *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2022. Т. 59. № 1. С. 873-885.
14. *Tan Z., Mueck M., Du X. H., Getzin L., Guidry M., Keating S., Xing X., Zhao F., Chen B.* A fully isolated delta-sigma ADC for shunt based current sensing // *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. 2016. Т. 51. № 10. С. 2232-2240.
15. *Oike Y.* Evolution of image sensor architectures with stacked device technologies // *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2021. Т. 69. № 6. С. 2757-2765.
16. *Казакевич Е. В., Однокурцев К. А., Трепалин П. В.* Анализ работы аналого-цифрового преобразователя параллельного типа для определения действующего значения напряжения при наличии во входном сигнале высших гармоник // *Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании*. 2021. С. 483-487.
17. *Bankman D., Yu A., Zheng K., Murmann B.* Understanding metastability in SAR ADCs: part I: synchronous // *IEEE Solid-State Circuits Magazine*. 2019. Т. 11. № 2. С. 86-97.
18. *Yu A., Bankman D., Zheng K., Murmann B.* Understanding metastability in SAR ADCs: part II: asynchronous // *IEEE Solid-State Circuits Magazine*. 2019. Т. 11. № 3. С. 16-32.
19. *Васильева Д. А., Бахтин А. А.* Разработка компаратора для высокоскоростного АЦП последовательного приближения // *Материалы научно-технической конференции «Микроэлектроника и информатика–2021»*. (Зеленоград, 29–30 апреля 2021 г.) Москва, 2021. С. 10-12.
20. *Меркель П. Д.* Параллельный АЦП с возможностью каскадирования // *Точная наука*. 2019. № 52. С. 2-5.

## INVESTIGATION OF INTEGRATED ISOLATION CIRCUITS OF ANALOG-TO-DIGITAL CONVERTERS

### ANDREY N. GLAZUNOV

Student, I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad,  
Russia, Senior Engineer, Network Operation  
Department, MTS PJSC Branch in the Kaliningrad  
Region, mail@mail.ru

### ALEXANDR A. EFIMOV

student, I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad,  
Russia, mail@mail.ru

### ABSTRACT

**Introduction:** Modern devices containing converters are combined with many other devices that create interference for the operation of analog-to-digital converters (ADCs), which affects the quality, in particular, the bit width of the digitized signal.

**Problem statement:** in this regard, to ensure electromagnetic compatibility, the circuit technology uses isolation of various blocks of the device, which helps to avoid the influence of interference from one block on other blocks. The subjects of research are ADC isolators. The aim of the study is to search for optimal circuit solutions for isolating modern ADCs with built-in comparator blocks. **Methods:** The research methodology is based on comparing the permissible levels of comparators for different types of isolation. Two types of insulating devices according to the physical principle, optical and magnetic, were considered. Analog and digital isolating devices have been studied from the point of view of the type of signal being processed. **Results:** based on the conducted analytical review, methods of isolation of serial and parallel ADCs were proposed, taking into account their technical characteristics. Special attention was paid to the parallel ADC with a built-in comparator. The essence of such a parallel ADC is that the emitter and receiver of the insulator are combined with the comparator of the parallel ADC. Variants of the scheme with an opto-insulator, a magneto-insulator and an integrated beam tube has been considered and analyzed. **Practical significance:** circuit solutions were proposed, permissible levels of comparators were investigated. It was shown that the use of an integrated isolation ADC can be widely used in digitizing signals for various applications, mainly in industrial installations. **Discussion:** In the future, optical insulator integration technologies can be used to create quantum processors and artificial intelligence systems.

**Keywords:** insulator; ADC; magnetic insulator; opto-insulator; galvanic coupling; input voltage; integration.

## REFERENCES

1. Volik A. V. Digital signal processing. *Informatsionnye tekhnologii v nauke i obrazovanii. Problemy i perspektivy* [Information technologies in science and education. Problems and prospects]. 2022. Pp. 177-180. (In Rus)
2. Zaytsev V. V. Physically based discretization of time in mathematical models of generators of regular and chaotic oscillations. *Fizika volnovykh protsessov i radiotekhnicheskie sistemy* [Physics of wave processes and radio engineering systems]. 2019. V. 22. No 3. Pp. 44-48. (In Rus)
3. Kwon Y., Kim H., Kim J., Han K., You D., Heo H., Cho D. D., Ko H. Fully differential chopper-stabilized multipath current-feedback instrumentation amplifier with R-2R DAC offset adjustment for resistive bridge sensors. *Applied sciences*. 2019. V. 10. No 1. Pp. 63.
4. Svoboda M., Sotner R., Polak L. Practical aspects of impedance measurement using operational amplifier and oscilloscope. *2022 32nd International Conference Radioelektronika. IEEE, 2022*. Pp. 01-04.
5. Tarasov V. V., Fedotov D. O., Ermakov A. K., Petrov A. C. Analiz svoystv pomekhozashchishchennosti signalov s kvadrurnoy amplitudnoy modulyatsiyey i fazovoy manipulyatsiyey [Analysis of noise immunity properties of signals with quadrature amplitude modulation and phase manipulation]. *Sbornik dokladov Tre'tey Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii "Radiotekhnicheskie, opticheskie i biotekhnicheskie sistemy. Ustroystva i metody obrabotki informatsii"* [Collection of reports of the Third All-Russian Scientific Conference "Radio engineering, optical and biotechnical systems. Devices and methods of information processing"] (St. Petersburg, April 14–22, 2022) (St. Petersburg, 2022. Pp. 96-98. (In Rus)
6. Filatov V. I., Borukaeva A. O., Berdikov P. G. Ways to increase noise immunity in radio channels. *Politekhnikeskiiy zhurnal* [Polytechnic Youth Journal]. 2019. No 3. Pp. 4-14. (In Rus)
7. Bu Q., Wen H., Shi H., Hu Y., Yang Y. Universal transient dc-bias current suppression strategy in dual-active-bridge converters for energy storage systems. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. 2020. V. 7. No 2. Pp. 509-526.
8. Kaczmarek M. Two Channels Opto-Isolation Circuit for Measurements of the Differential Voltage of Voltage Transformers and Dividers. *Energies*. 2022. V. 15. No 7. P. 2694.
9. Majareh S. H. L., Sedaghati F., Hosseinpour M., Mousavi-Aghdam S. R. Design, analysis and implementation of a generalised topology for multilevel inverters with reduced circuit devices. *IET Power Electronics*. 2019. V. 12. No 14. Pp. 3724-3731.
10. Brian J. Isolated interfaces  $\mu$ Module from Linear Technology. *Komponenty i Tekhnologii* [Components and Technologies]. 2017. No 10. Pp. 34-38. (In Rus)
11. Rentyuk V., Bashmakov P. Micromodule Insulators: Highly integrated isolated interfaces for critical applications from Linear Technology (LTC). *Vestnik elektroniki* [Bulletin of Electronics]. 2016. No 3(57). (In Rus)
12. Ling Y. Design and implementation of an analog signal isolation conditioning circuit. *Journal of Physics: Conference Series*. 2022. V. 2338. No 1. P. 012071.
13. Li C., Vankayalapati B. T., Akin B., Yu Zh. Analysis and Compensation of Sigma-Delta ADC Latency for High Performance Motor Control and Diagnosis. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2022. V. 59. No 1. Pp. 873-885.
14. Tan Z., Mueck M., Du X. H., Getzin L., Guidry M., Keating S., Xing X., Zhao F., Chen B. A fully isolated delta-sigma ADC for shunt based current sensing. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. 2016. V. 51. No 10. Pp. 2232-2240.
15. Oike Y. Evolution of image sensor architectures with stacked device technologies. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2021. V. 69. No 6. Pp. 2757-2765.
16. Kazakevich E. V., Odnokurtsev K. A., Trepalin P. V. Analysis of the operation of a parallel analog-to-digital converter to determine the effective voltage value in the presence of higher harmonics in the input signal. *Aktual'nye problemy infotelekomunikatsiy v nauke i obrazovanii* [Actual problems of infotelecommunications in science and education]. 2021. Pp. 483-487. (In Rus)
17. Bankman D., Yu A., Zheng K., Murmann B. Understanding metastability in SAR ADCs: part I: synchronous. *IEEE Solid-State Circuits Magazine*. 2019. V. 11. No 2. Pp. 86-97.

18. Yu A., Bankman D., Zheng K., Murmann B. Understanding metastability in SAR ADCs: part II: asynchronous. *IEEE Solid-State Circuits Magazine*. 2019. V. 11. No 3. Pp. 16-32.
19. Vasilieva D. A., Bakhtin A. A. Razrabotka komparatora dlya vysokoskorostnogo ATsP posledovatel'nogo priblizheniya [Development of a comparator for high-speed ADC sequential approximation]. *Materialy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Mikroelektronika i informatika–2021"* [Proceedings of the scientific and technical conference "Microelectronics and Informatics-2021"] (Zelenograd, April 29–30, 2021) Moscow, 2021. Pp. 10-12. (In Rus)
20. Merkel P. D. Parallel ADC with cascading capability. *Tochnaya nauka* [Exact science]. 2019. No 52. Pp. 2-5. (In Rus)