

Получено: 17.04.2023 г. | Принято: 21.04.2023 г. | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2023.16.3-4.220.230>

Научная статья

## СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТОКОВ С ПОМОЩЬЮ ДАТЧИКОВ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

В.В.Полевиков<sup>1</sup>, к. т. н., директор Дизайн-центра АО "ЗНТЦ",

ORCID: 0000-0002-3508-7906 / [polevikov@zntc.ru](mailto:polevikov@zntc.ru)

Э.О.Литвиненко<sup>1</sup>, магистр, инженер-конструктор, ORCID: 0000-0001-5313-6348

**Аннотация.** Во многих сферах применения измерительных устройств на основе датчиков лидируют датчики магнитного поля. Поэтому задача измерения токов величин сводится к выбору между AMR-датчиком и датчиком Холла. В статье представлены основные преимущества и недостатки каждого из двух типов датчиков, методы оптимизации их основных характеристик, а также результаты, которых удалось достигнуть компании "Зеленоградский нанотехнологический центр" в освоении и производстве магнитных преобразователей.

**Ключевые слова:** датчики, датчики тока, Холл, AMR, магниторезисторы

**Для цитирования:** В.В. Полевиков, Э.О. Литвиненко. Современные методы контроля электрических токов с помощью датчиков физических величин. НАНОИНДУСТРИЯ. 2023. Т. 16, № 3-4. С. 220-230. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2023.16.3-4.220.230>

Received: 17.04.2023 | Accepted: 21.04.2023 | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2023.16.3-4.220.230>

Original paper

## MODERN METHODS FOR MONITORING ELECTRICAL CURRENTS USING PHYSICAL VALUES SENSORS

В.В.Полевиков<sup>1</sup>, Cand. of Sci. (Tech), Director of Design Centre JSC "Zelenograd Nanotechnology Center",

ORCID: 0000-0003-1113-0428 / [polevikov@zntc.ru](mailto:polevikov@zntc.ru)

Е.О.Литвиненко<sup>1</sup>, Magister, Design Engineer, ORCID: 0000-0003-3638-7932

**Abstract.** Magnetic field sensors are very important for many sensor-based measurement applications. Therefore, measuring current values comes down to a choice between an AMR sensor and a Hall sensor. This paper presents the main advantages and disadvantages of each of the two types of sensors, methods for optimising their main characteristics, as well as the results achieved by Zelenograd Nanotechnology Centre in mastering and producing magnetic transducers.

**Keywords:** detectors, current sensor, Hall sensor, AMR, magnetoresistors

**For citation:** V.V. Polevikov, E.O. Litvinenko. Modern methods for monitoring electrical currents using physical values sensors. NANOINDUSTRY. 2023. V. 16, no. 3-4. PP. 220-230. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2023.16.3-4.220.230>.

<sup>1</sup> АО "Зеленоградский нанотехнологический центр" Москва, Зеленоград, Россия / JSC "Zelenograd Nanotechnology Center" Moscow, Zelenograd, Russia.

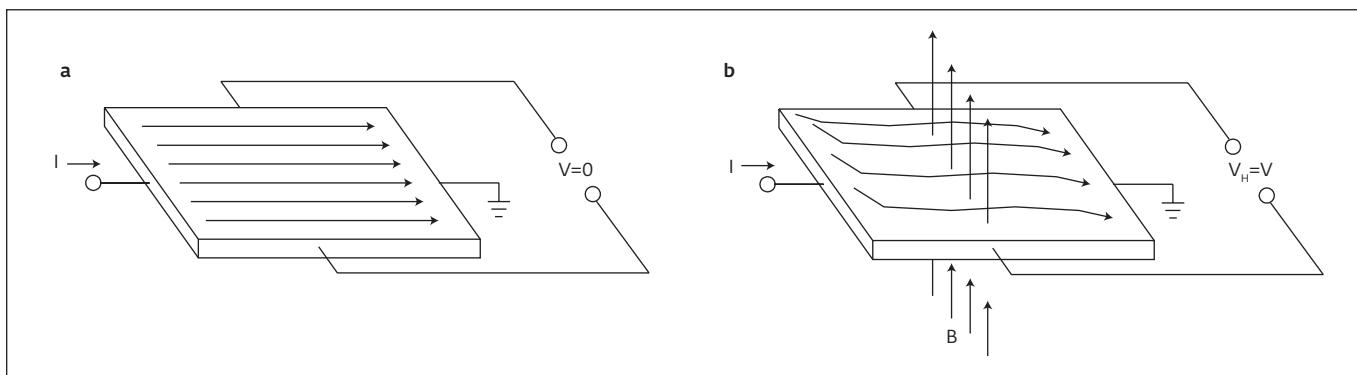


Рис.1. Принцип эффекта Холла при отсутствии магнитного поля (a) и при наличии магнитного поля (b)  
Fig.1. Hall effect principle without (a) and with (b) magnetic field

## ВВЕДЕНИЕ

Оптимальным решением для контроля электрических токов является использование малогабаритных, надежных устройств преобразования магнитного поля в электрический сигнал – датчиков. Основной инструмент для этого – классические датчики Холла и устройства на анизотропных магниторезистивных пленках – AMR-преобразователи.

Во всех областях применения датчиков физических величин при измерении сигналов существует набор параметров, который необходимо отслеживать для стабильной работы устройства, на который поступает сигнал с этого датчика. В данной работе представлены основные преимущества и недостатки каждого из двух типов представленных датчиков, методы оптимизации их характеристик, таких как напряжение смещение нуля и 1/f фликкер-шумы, а также результаты, которых удалось достичь компании “Зеленоградский нанотехнологический центр” в освоении и производстве магнитных преобразователей.

## КОНТРОЛЬ ТОКОВ С ПОМОЩЬЮ ДАТЧИКОВ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Датчики магнитного поля широко используются во многих сферах применения, таких как промышленность, медицина, мобильные технологии и, в особенности, автоэлектроника, которая является ведущей (объем выпуска более 50% от общего объема рынка) областью их применения [1]. Они обеспечивают удобные, бесконтактные, прочные и надежные рабочие устройства по сравнению со многими другими датчиками. В этих отраслях с целью использования их в измерительных системах доминируют два вида датчиков – датчики, работающие на эффекте Холла, и так называемые AMR-датчики.

## INTRODUCTION

The optimal solution for monitoring electrical current is the use of small, reliable magnetic field to electrical signal conversion devices called sensors. The basic tools for this are classic Hall sensors and devices on anisotropic magnetoresistive films - AMR converters.

In all applications of physical values sensors in signal measurement, there is a set of parameters that must be monitored for the stable operation of the device where the signal from that sensor is applied. This paper presents the main advantages and disadvantages of each of the two types of sensors presented, methods for optimising their characteristics, such as zero offset voltage and 1/f flicker noise, and the results achieved by Zelenograd Nanotechnology Centre in developing and producing magnetic transducers.

## MONITORING CURRENTS WITH PHYSICAL VALUES SENSORS

Magnetic field sensors are widely used in many applications such as industry, medicine, mobile technology and especially automotive electronics, which is the leading (over 50% of the total market volume) area of application [1]. They provide convenient, non-contact, robust and reliable operating devices compared to many other sensors. Two types of sensors – Hall-effect sensors and so-called AMR sensors – dominate in these industries for their use in measuring systems.

The Hall effect in semiconductors is manifested when it is placed in a magnetic field. The Hall voltage will then be generated perpendicular to both the current and the field. Figure 1 shows a thin sheet of semiconductor material (a Hall element) when a current is passed. The output connections are perpendicular to the current direction. If magnetic field is absent (a), the current distribution is uniform and there is no potential difference at the output.

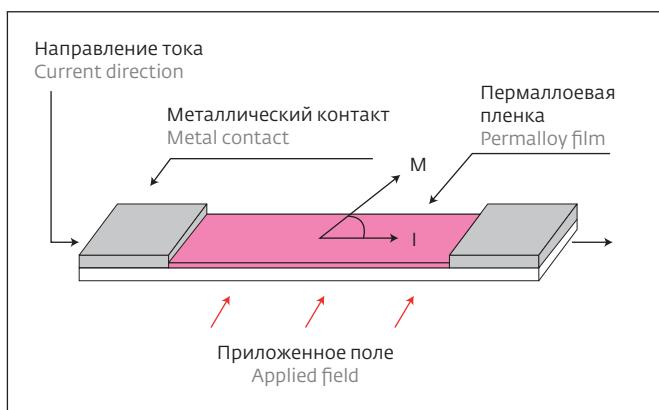


Рис.2. Пермаллоевая магниторезистивная пленка AMR-датчика

Fig.2. Permalloy magnetoresistive film of an AMR sensor

Эффект Холла в полупроводниках проявляется, когда он помещен в магнитное поле. Тогда напряжение Холла будет генерироваться перпендикулярно как току, так и полю. На рис.1 изображен тонкий лист полупроводникового материала (элемент Холла), через который пропускается ток. Выходные соединения расположены перпендикулярно направлению тока. При отсутствии магнитного поля (а) распределение тока равномерное и разность потенциалов на выходе не наблюдается.

При наличии перпендикулярного магнитного поля (б) действует сила Лоренца. Эта сила нарушает распределение тока, что приводит к возникновению разности потенциалов (напряжению) на обкладках. Это напряжение является напряжением Холла ( $V_H$ ) [2].

В основе принципа действия работы AMR-датчиков лежит эффект изменения магнитной пленки в магнитном поле, когда сопротивление материала имеет тенденцию изменяться под воздействием внешних магнитных полей. В анизотропной магниторезистивности (AMR) сопротивление ( $\Delta R$ ) изменяется в зависимости от угла  $\theta$  между электрическим током и намагничиванием металла (рис.2). Как и в случае датчиков с эффектом Холла, основной причиной магниторезистивности является сила Лоренца, которая заставляет электроны двигаться по криволинейному пути между столкновениями [3].

Датчики с эффектом Холла реагируют на магнитные поля, перпендикулярные датчику. Датчики AMR же реагируют на планарные поля и реагируют на оба магнитных полюса. Поэтому датчик AMR имеет несколько доступных схем размещения для обнаружения планарных

When magnetic field is perpendicular (b), a Lorentz force acts. This force disturbs the current distribution, resulting in a potential difference (voltage) across the coils. This voltage is the Hall voltage ( $V_H$ ) [2].

The principle of AMR sensors operation is based on the effect of a magnetic film changing in a magnetic field, where material resistance tends to change under external magnetic fields influence. In anisotropic magnetoresistance (AMR) the resistance changes ( $\Delta R$ ) depending on the angle  $\theta$  between electric current and metal magnetisation (Fig.2). As in the case of Hall effect sensors, the main cause of magnetoresistance is the Lorentz force, which causes electrons to move along a curved path between collisions [3].

Hall effect sensors respond to magnetic fields perpendicular to the sensor. On the other hand, AMR sensors respond to planar fields and react to both magnetic poles. Therefore, AMR sensor has several layout options available to detect planar magnetic fields and as a result it offers a wide design flexibility. Hall effect sensors, in opposite, typically perform accurate magnetic field detection in perpendicular direction, and because it is recommended that the magnet be located directly above the Hall effect sensor and at close range, it has limited design flexibility (Fig.3) [4].

Hall sensors have a higher linearity (Hall EMF is linearly dependent on the applied magnetic field) than AMR sensors. This linearity is evident in the range up to a few thousand Gs. The nature of AMR sensors is different, as the linear section of their transfer characteristic is short, and saturation occurs at induction of a few tens (maximum hundreds) of Gs. However, AMR sensors sensitivity is much higher than that of Hall effect sensors, which allows them to detect even the weakest magnetic fields (from 1mT).

Another difference between AMR and Hall sensors is that they can be manufactured in bulk on silicon wafers and mounted in commercially available integrated circuit packages. This allows magnetic sensors to be automatically assembled with other circuit and system components. Hall sensors are often also integrated directly into a wafer with necessary amplifier stage to generate signals.

However, when using with both Hall and AMR sensors, you must be aware of the problems that can occur when using them. The zero offset voltage in sensors is voltage that can be measured at the sensor output if magnetic field is absent. It arises due to imperfect sensor design and, just like noise in sensor structures, can lead to measurement errors. Therefore, in order to accurately measure electrical currents with physical values sensors, these parameters must be taken into account and compensated for.



магнитных полей, и в результате он обладает широкой гибкостью конструкции. Датчики эффекта Холла, с другой стороны, обычно выполняют точное обнаружение магнитного поля в перпендикулярном направлении, и поскольку рекомендуется, чтобы магнит находился непосредственно над датчиком эффекта Холла и на близком расстоянии, он имеет ограниченную гибкость конструкции (рис.3) [4].

Датчики Холла характеризуются более высокой линейностью (ЭДС Холла линейно зависит от приложенного магнитного поля), в отличие от AMR-датчиков. Эта линейность проявляется в диапазоне до нескольких тысяч Гс. Природа AMR-датчиков проявляется иначе – линейный участок их передаточной характеристики короткий, а насыщение наступает при индукции в несколько десятков (максимум – сотен) Гс. Однако чувствительность AMR-датчиков намного выше, чем у датчиков на эффекте Холла, что позволяет им определять даже самые слабые магнитные поля (от 1 мТл).

Еще одним отличием датчиков AMR от датчиков Холла является то, что они могут изготавливаться оптом на кремниевых пластинках и монтироваться в коммерческие пакеты интегральных схем. Это позволяет автоматически собирать магнитные датчики с другими компонентами схемы и систем. Датчики Холла зачастую же интегрированы прямо в пластину с необходимым усилительным каскадом для формирования сигналов.

Однако при работе и с датчиками Холла, и с AMR-датчиками нужно помнить о проблемах, которые могут возникнуть при их использовании. Напряжение смещения нуля в датчиках – это напряжение, которое может быть измерено на выходе датчика при отсутствии магнитного поля. Оно возникает из-за несовершенства конструкции датчика и точно так же, как и шумы, возникающие в структуре датчиков, может привести к ошибкам измерений. Поэтому для точного измерения электрических токов с помощью датчиков физических величин необходимо учитывать и компенсировать эти параметры.

### КОРРЕКЦИЯ НАПРЯЖЕНИЯ СМЕЩЕНИЯ И 1/F ФЛИККЕР-ШУМОВ ДЛЯ ДАТЧИКОВ ХОЛЛА

Для того чтобы уменьшить смещение выходного сигнала, существует несколько методов. Первый метод подразумевает схему коррекции на входе усилительного каскада. На вход усилителя, помимо полезного сигнала, будет подаваться напряжение, равное по величине напряжению смещения, но обратное ему по знаку. Тем

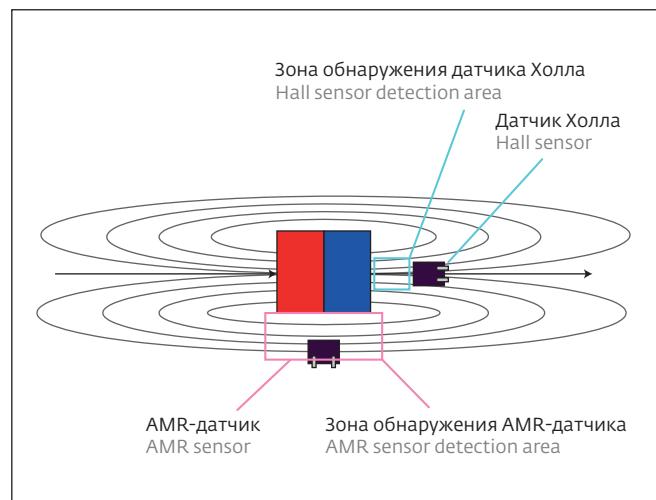


Рис.3. Конструкция датчика Холла и AMR-датчика  
Fig.3. Design of Hall and AMR sensor

### OFFSET VOLTAGE AND 1/F FLICKER NOISE CORRECTION FOR HALL SENSORS

In order to reduce the output signal bias, there are several methods. The first method involves a correction circuit at the input of the amplifier stage. A voltage equal in magnitude to the offset voltage, but opposite in sign, will be applied to the input of the amplifier in addition to the useful signal. This method will thus compensate the voltages and minimise the error (Fig.4). By varying the number of trim inputs and the resistors size, accuracy and magnitude of the offset correction can be varied.

The second method uses an even number of Hall elements connected orthogonally. The bias voltage depends on the Hall sensor geometry, whereas the Hall voltage and, hence, sensitivity are independent functions. As a result, the outputs of the devices can be connected in such a way that the corresponding Hall voltages are averaged and the bias voltages are compensated [5]. Thus, Fig.5 and 6 show that using this method makes it possible to reduce the bias by almost half.

With the third method (chopper stabilisation method) low frequency errors such as 1/f noise and drift will be modulated and filtered out along with the offset [5]. This can be seen in Fig.7, which depicts the chopper stabilisation method in the frequency domain. Firstly, the signal is modulated and noise and bias are superimposed on this modulated signal (Fig.7, b). After amplification and modulation it is necessary to demodulate the signal back to DC and low frequency noise and offset are modulated at the clock frequency, appearing as a ripple at the amplifier output (Fig.7, c). A low pass filter is then used to remove the modulated offset and 1/f noise, resulting

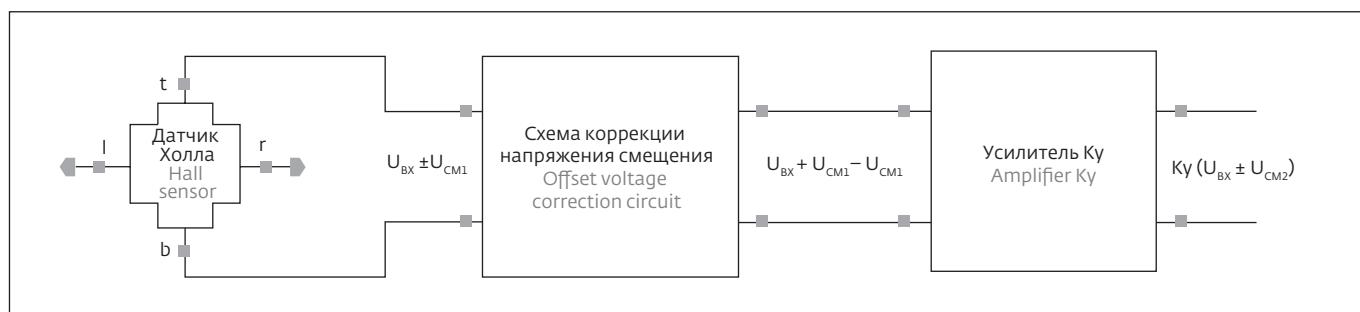


Рис.4. Внесение схемы коррекции напряжения смещения в систему обработки сигналов с датчика Холла  
Fig.4. Incorporating a bias voltage correction circuit into the Hall sensor signal processing system

самым данный метод позволит скомпенсировать напряжения и минимизировать ошибку (рис.4). Изменяя количество входов подстройки и размеры резисторов, можно варьировать точность и размах коррекции смещения.

Второй метод предполагает использование четного числа элементов Холла, связанных ортогонально. Напряжение смещения зависит от геометрии датчика Холла, тогда как напряжение Холла и, следовательно, чувствительность являются независимыми функциями. В результате выходы устройств могут быть подключены таким образом, чтобы соответствующие напряжения Холла усреднялись, а напряжения смещения компенсировались [5]. Так, на рис.5 и 6 видно, что при использовании данного метода возможно уменьшить смещение практически в два раза.

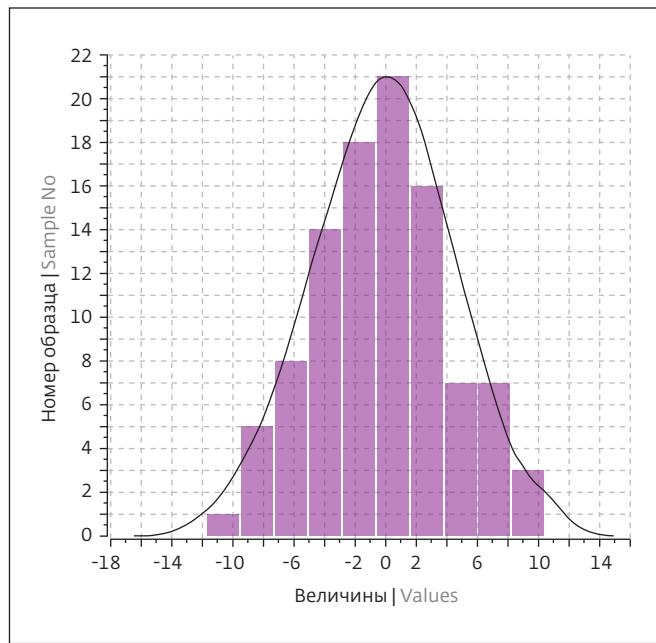


Рис.5. Смещения одного элемента Холла  
Fig.5. Single Hall element offsets

in only low frequency signal with no offset or 1/f noise (Fig 7, d) [6].

To remove the 1/f noise completely, the chopper frequency must be higher than angular frequency of the 1/f noise. This method can successfully remove error and noise from the amplifiers that are the basis of the processing channel. However, this method only removes error and low-frequency noise at the amplifier, but does not do the same for the transducer output.

The fourth method involves the use of a current rotator circuit, which is an alternative method of obtaining a signal from the probe (current rather than voltage mode of operation). During each phase  $F_s <1:4>$  the bias current  $I_{bias}$  is delivered to two consecutive arms; for a zero magnetic field it is divided into two equal parts, assuming that the voltages on the remaining two pins are equal. The

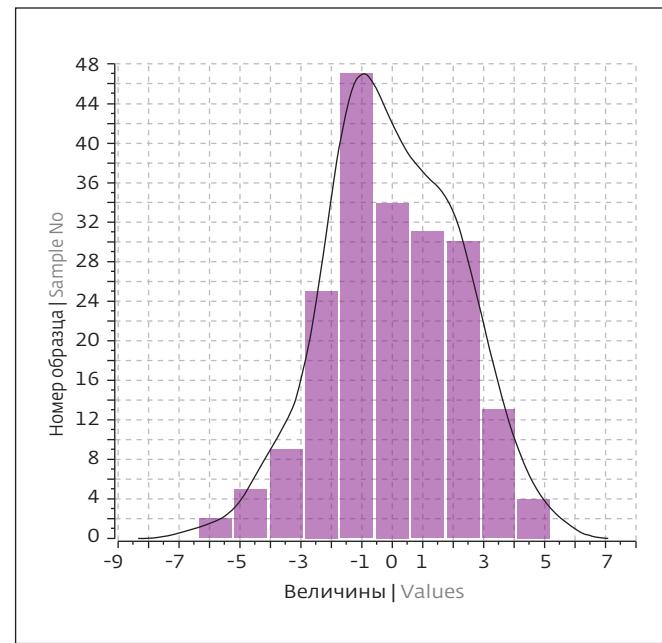


Рис.6. Смещения двух связанных ортогональных элементов Холла  
Fig.6. Offsets of two connected orthogonal Hall elements

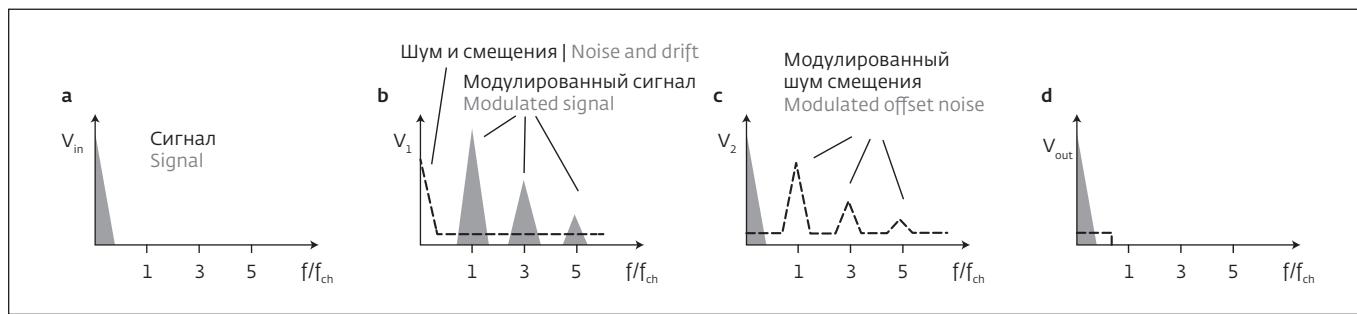


Рис.7. Принцип измельчения в частотной области

Fig.7. Grinding principle in the frequency domain

При использовании третьего метода (метод чопперной стабилизации) низкочастотные ошибки, такие как шум  $1/f$  и дрейф, будут модулироваться и отфильтровываться вместе со смещением [5]. Это можно видеть на рис.7, который изображает метод чопперной стабилизации в частотной области. Вначале сигнал модулируется, а шум и смещение накладываются на этот модулированный сигнал (рис.7b). После усиления и модулирования необходимо демодулировать сигнал обратно на постоянный ток, а низкочастотный шум и смещение модулируются на тактовой частоте, появляющиеся в виде пульсаций на выходе усилителя (рис.7c). Затем для удаления модулированного смещения и шума  $1/f$  используется фильтр низких частот, что приводит к чистому низкочастотному сигналу без смещения или шума  $1/f$  (рис.7d) [6].

Чтобы полностью удалить шум  $1/f$ , частота чоппера должна быть выше, чем угловая частота шума  $1/f$ . Данный метод позволяет успешно устранить погрешность и шум усилителей, являющихся основой канала обработки. Однако этот метод позволяет устранить погрешность и низкочастотный шум только на усилителе, но не позволяет добиться этого же для выходного сигнала датчиков.

Четвертый метод предполагает использование схемы токового вращателя, который является альтернативным методом получения сигнала с датчика (режим работы с токами, а не с напряжениями). Во время каждой фазы  $F_s<1:4>$  ток смещения  $I_{bias}$  поступает в два последовательных плеча; для нулевого магнитного поля он делится на две равные части, предполагая, что напряжения на оставшихся двух выводах равны. Выходные и питающие клеммы каждой пластины Холла периодически меняются местами, так что полярность входного тока меняется в каждом состоянии, в то время как смещение появляется на выходных клеммах.

output and supply terminals of each Hall plate are periodically reversed, so that polarity of the input current is reversed in each state, while the bias appears on the output terminals. At the end of a complete rotation operation, the average offset value becomes zero (Fig.8) [7].

Since the current rotator implementation involves only the Hall elements themselves and CMOS switches, this circuit will not take up much space on-chip and it also successfully combats  $1/f$  noise and sensor bias. The disadvantages are the output signal attenuation, which can be eliminated by using an amplifier with a higher  $K_y$ .

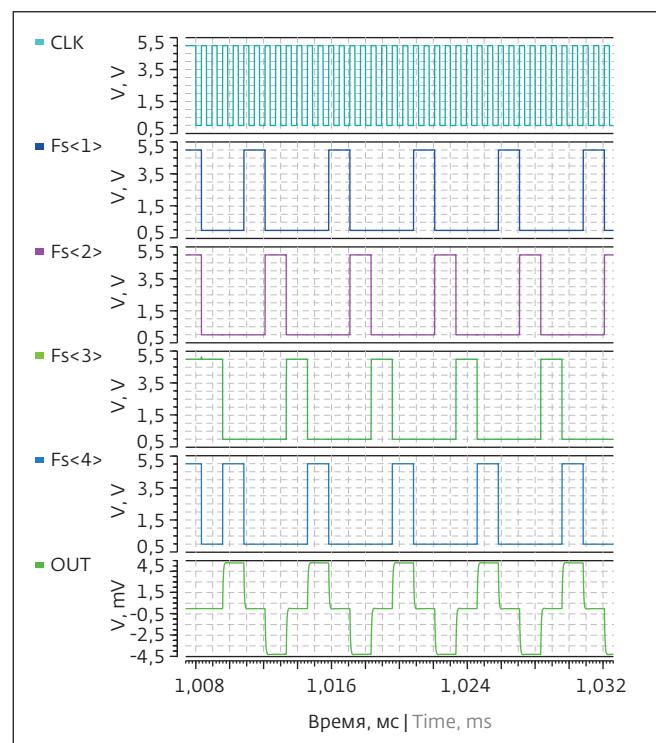


Рис.8. Временная диаграмма использования токового вращателя

Fig.8. Time diagram of current rotator use

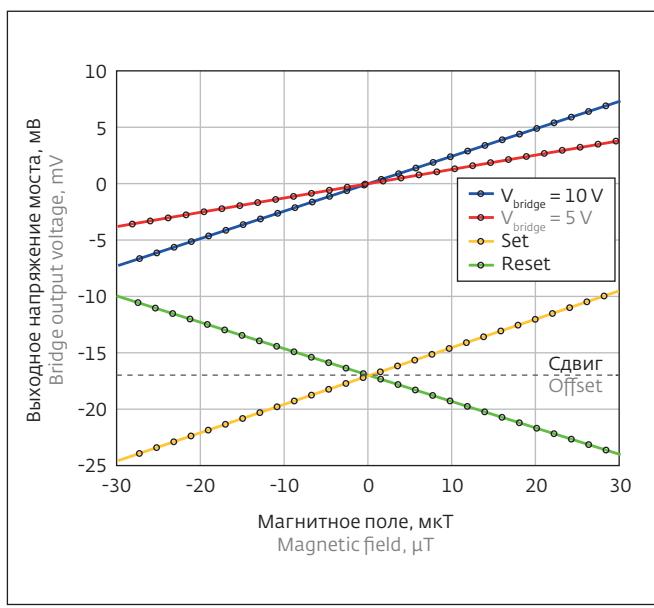


Рис.9. Влияние катушки SET/RESET на передаточную характеристику  
Fig.9. Effect of SET/RESET coil on transmission response

В конце полной операции вращения среднее значение смещения становится равным нулю (рис.8) [7].

Так как реализация токового вращателя включает в себя только сами элементы Холла и КМОП-переключатели, данная схема не будет занимать много места на кристалле, а также она успешно борется с 1/f шумами и смещением сенсоров. Из недостатков можно выделить ослабление выходного сигнала, от которого можно избавиться при использовании усилителя с более высоким  $K_y$ .

### КОРРЕКЦИЯ НАПРЯЖЕНИЯ СМЕЩЕНИЯ И 1/F ФЛИККЕР-ШУМОВ ДЛЯ АМР-ДАТЧИКОВ

Эффективный способ снижения температурного дрейфа напряжения смещения посредством использования стабилизирующего переменного поля был предложен Туманским (1984). Для его реализации используется специальная планарная катушка, генерирующая стабилизирующее поле. На рис.9 представлен метод, использующий сигналы сброса (RESET) и установки (SET).

Передаточная характеристика датчика показывает инверсию наклона и точку пересечения при нулевом напряжении смещения. Для измерения приложенного поля  $H$  датчик сначала активируется сигналом установки SET (рис.10).

После установления напряжения  $V_{set}$  оно считывается и записывается. После этого подается сигнал сброса и считывается напряжение  $V_{reset}$ . Так мы получаем два значения:

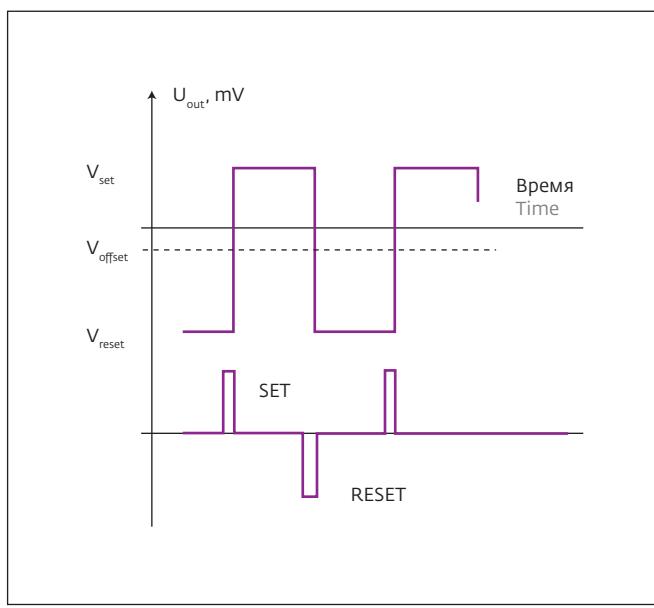


Рис.10. Временная диаграмма выходного сигнала с датчика  
Fig.10. Time diagram of the sensor output signal

### OFFSET VOLTAGE AND 1/F FLICKER NOISE CORRECTION FOR AMR SENSORS

An effective way to reduce temperature drift of the bias voltage by using a stabilising AC field has been proposed by Tumansky (1984). It uses a special planar coil to generate stabilising field. Figure 9 shows this method using reset (RESET) and set (SET) signals.

The transfer characteristic of the sensor shows slope inversion and the crossover point at zero offset voltage. To measure the applied field  $H$ , the sensor is first activated by a SET setting signal (Fig.10).

Once the  $V_{set}$  voltage has been established, it is read out and recorded. The reset signal is then applied and the  $V_{reset}$  voltage is read. This gives us two values:

$$V_{SET} = SH_x + V_{OFFSET} \quad (1)$$

$$V_{RESET} = -SH_x + V_{OFFSET}. \quad (2)$$

The difference between two values is only proportional to the field magnitude and the bias voltage is not taken into account [8]:

$$V_{SET} - V_{RESET} = 2SH_x. \quad (3)$$

In addition, advantage of performing modulation methods using switching pulses is to reduce the 1/f noise within the desired bandwidth [9]. In addition to the SET/RESET coil there is possibility of using an OFFSET coil which will compensate for any external magnetic field if required.

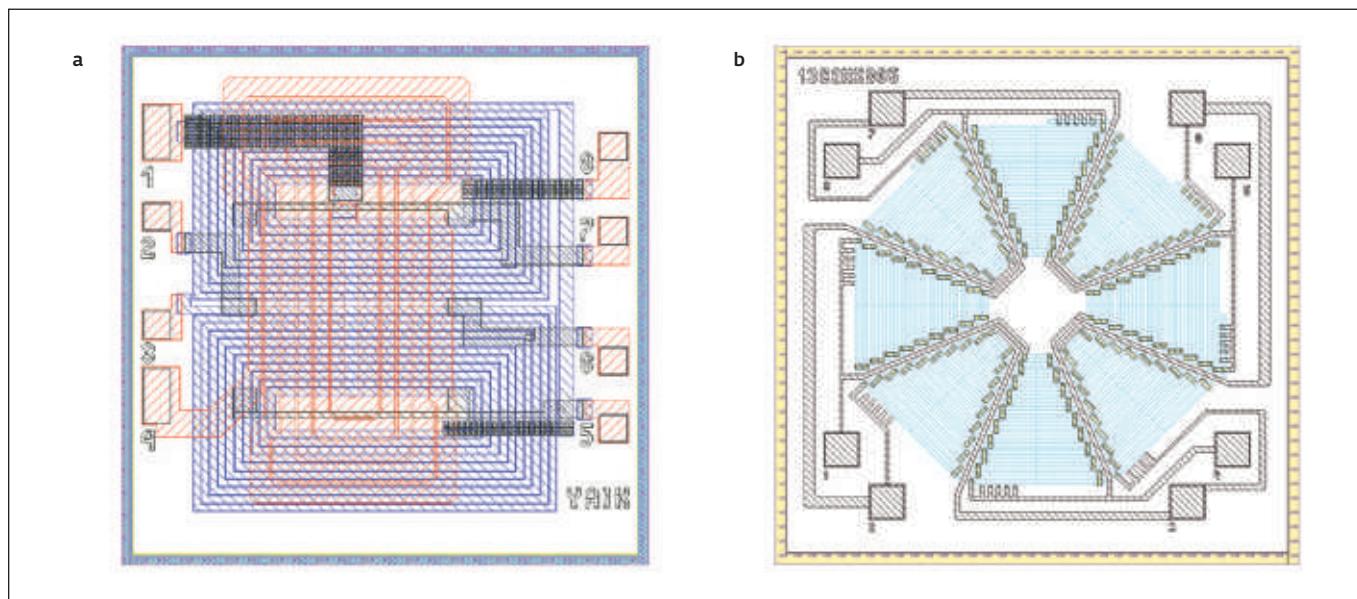


Рис.11. Микросхема 5202HX01H4 (a) и микросхема 1382HX065 (b)

Fig.11. 5202HX01H4 (a) and 1382HX065 (b) microcircuits

$$V_{SET} = SH_x + V_{OFFSET} \quad (1)$$

$$V_{RESET} = -SH_x + V_{OFFSET}. \quad (2)$$

Разница двух значений пропорциональна только величине поля, а напряжение смещения не учитывается [8]:

$$V_{SET} - V_{RESET} = 2SH_x. \quad (3)$$

Кроме того, преимуществом выполнения методов модуляции с использованием переключающих импульсов является уменьшение  $1/f$  шума в пределах желаемой полосы пропускания [9]. Помимо катушки SET/RESET, есть возможность использования катушки OFFSET, которая будет компенсировать при необходимости любое внешнее магнитное поле.

### ПРОДУКЦИЯ АО "ЗНТЦ"

В Зеленоградском нанотехнологическом центре освоена технология получения магниторезистивных чувствительных элементов (МЧЭ), включающая нанесение магниторезистивных пленок с магниторезистивным эффектом от 2 до 3,5%, формирование фотолитографией на их основе системы проводников из нескольких слоев и сборку их в корпуса.

Это позволило разработать и освоить в производстве такие схемы, как 5202HX01H4 и 1382HX065. Первая предназначена для навигации, наведения

### JSC "ZELENOGRAD NANOTECHNOLOGY CENTER" PRODUCTS

Zelenograd Nanotechnology Centre developed a technology for producing magnetoresistive sensitive elements (MRSE), which includes applying magnetoresistive films with a magnetoresistive effect of 2% to 3.5%, photolithography to form on their basis a system of multiple-layer conductors, and assemble them into packages.

This led to development and manufacture of circuits such as 5202HX01H4 and 1382HX065. The first one is designed for navigation, guidance and orientation in space, object movement detection and anomaly detection. MRSE of the first circuit is based on  $80\text{Ni}_{20}\text{Fe}$  film, with magnetoresistance effect value  $\sim 2.2\%$ . The MRSE of this chip has characteristics similar to Honeywell's HMC1022 sensor.

The second microcircuit is designed for tracking systems of rudder angle control of aircrafts and tracking system drives parameters. Second MRSE circuit is made on  $74\text{Ni}_{10}\text{Fe}_{16}\text{Co}$  film with magnetoresistance effect value  $\sim 3.5\%$ . As a result, this circuit achieves 100 mV output at 5 V supply voltage with high degree of output signal synchronization. The chip is an analogue of the world's leading microcircuits in its characteristics.

In addition, in ZNC JSC was developed the design and manufacturing base and has mastered production of a range of Hall and AMR sensor microcircuits, including not only microcircuits for



и ориентирования в пространстве, для определения движения объектов и обнаружения аномалий. МЧЭ первой схемы выполнен на пленке состава  $80\text{Ni}_{20}\text{Fe}$  с величиной магниторезистивного эффекта  $\sim 2,2\%$ . МЧЭ данной микросхемы имеет характеристики, близкие к датчику HMC1022 Honeywell.

Вторая микросхема предназначена для следящих систем углов поворота управления рулями летательных аппаратов и контроля параметров приводов следящих систем. МЧЭ второй схемы выполнен на пленке состава  $74\text{Ni}_{10}\text{Fe}_{16}\text{Co}$  с величиной магниторезистивного эффекта  $\sim 3,5\%$ . В результате в этой схеме получена величина выходного сигнала 100 мВ при напряжении питания 5 В с высокой степенью синхронизации выходных сигналов между собой. Микросхема является по своим характеристикам аналогом микросхем ведущих мировых производителей.

Помимо этого, в АО "ЗНТЦ" создана конструкторско-технологическая база и освоено производство ряда микросхем на датчиках Холла и AMR-датчиках, включающих в себя не только микросхемы для контроля электрических токов больших величин, но и для измерения угла поворота, обработки нониусных сигналов, энкодеры, углового положения, а также для работы в устройствах специального назначения и т.д.

Микросхема K1382NU01A5 (рис.12) предназначена для преобразования измеренного значения магнитного поля проводника с током в выходные сигналы стандартных интерфейсов бесконтактного датчика тока. В качестве чувствительного элемента бесконтактного датчика тока может использоваться внешний магниторезистивный или встроенный датчик на эффекте Холла. Датчик располагается над проводником печатной платы. Микросхема усиливает сигналы датчика, преобразует и выдает сигнал в виде стандартных интерфейсов. Микросхема содержит встроенную систему коррекции температурной зависимости магниточувствительного элемента.

## ВЫВОДЫ

В заключении необходимо отметить, что устройства на AMR-датчиках и на датчиках Холла являются практически незаменимым инструментом при работе с магнитными полями за счет своей относительной технологической простоты, надежности и невысокой цены. Выбор между ними определяется только техническим заданием заказчика, практически все серьезные недостатки обоих датчиков можно убрать с помощью методов, описанных в статье.

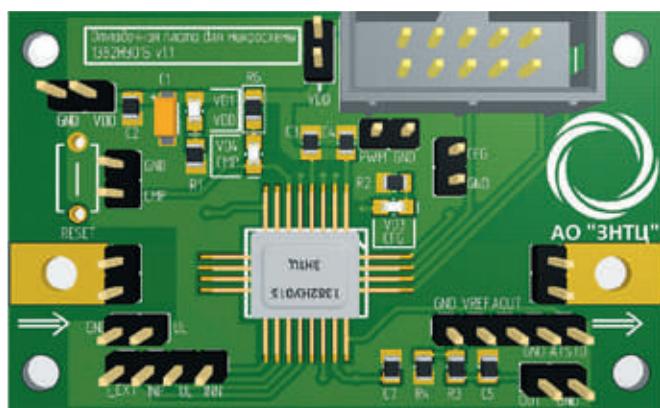


Рис.12. ИС датчика тока K1382NU01A5

Fig.12. K1382NU01A5 integrated circuit

monitoring electrical currents of large magnitudes, but also for measuring rotation angle, processing nonius signals, encoders, angular position, and for use in special-purpose devices, etc.

Microcircuit K1382NU01A5 (Fig.12) is designed to convert the measured value of magnetic field of conductor with current into the output signals of standard interfaces of proximity current sensor. An external magnetoresistive or internal Hall effect sensor can be used as a current proximity sensor. The sensor is placed over the conductor of the printed circuit board. The chip amplifies the sensor signals, converts them and outputs the signal as standard interfaces. The chip contains a built-in system for correcting magnetosensitive element temperature dependence.

## CONCLUSIONS

In conclusion, AMR and Hall sensors are virtually indispensable tools in magnetic field applications due to their relative technological simplicity, reliability and low price. The choice between these two devices is determined solely by the customer's specifications, virtually all of the serious drawbacks of both sensors can be removed using the methods described in this paper.

## PEER REVIEW INFO

Editorial board thanks the anonymous reviewer(s) for their contribution to the peer review of this work. It is also grateful for their consent to publish papers on the journal's website and SEL eLibrary eLIBRARY.RU.

**Declaration of Competing Interest.** The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.



# ТЕРМООБРАБОТКА

Шестнадцатая международная специализированная выставка

Единственная в России выставка  
термического оборудования и технологий

12 - 14 сентября 2023

Россия, Москва, ЦВК "Экспоцентр", павильон 7



## Основные разделы:

- » Оборудование для термической и химико-термической обработки
- » Промышленные печи и сушильные шкафы
- » Жаропрочная оснастка
- » Индукционное оборудование
- » Огнеупорные и теплоизоляционные материалы
- » Изделия из графита, углеродного волокна и углерод-углеродных композитов
- » Лабораторное и контрольно-измерительное оборудование
- » Вакуумная техника
- » Автоматизация производства

Организатор:



Независимый  
выставочный  
аудит



В рамках выставки "Термообработка - 2023" 13 сентября пройдёт  
Шестнадцатая международная научно-практическая конференция  
"Инновационные технологии термообработки"  
Место проведения: Москва, ЦВК "Экспоцентр", павильон 7, конференц-зал

## Информационная поддержка:



Официальный сайт выставки:  
[www.htexporus.ru](http://www.htexporus.ru)

@termoobrabotka @htexpo\_ru  
 YouTube [youtube.com/user/termoobrabotka](https://youtube.com/user/termoobrabotka)



### ИНФОРМАЦИЯ О РЕЦЕНЗИРОВАНИИ

Редакция благодарит анонимного рецензента (рецензентов) за их вклад в рецензирование этой работы, а также за размещение статей на сайте журнала и передачу их в электронном виде в НЭБ eLIBRARY.RU.

**Декларация о конфликте интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в данной статье.

### ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Сысоева С. Датчики магнитного поля. Ключевые технологии и новые перспективы. Ч. 3. XMR (AMP/GMR/TMR) – конкуренты датчиков Холла // Компоненты и технологии. 2014. № 8. С. 49–62.
2. Hall Effect Sensing and Application [Электронный ресурс]. Доступно по ссылке: [https://win.adrirobot.it/sensori/sensore\\_magnetico/Esempi\\_applicativi\\_sensore-magnetico.pdf](https://win.adrirobot.it/sensori/sensore_magnetico/Esempi_applicativi_sensore-magnetico.pdf) (дата обращения: 11.04.2023).
3. Yang S., Zhang J. Current Progress of Magnetoresistance Sensors // Chemosensors. 2021. No. 9(8). PP. 1–23.
4. Fundamentals of magnetic sensors: Differences between AMR sensors (magnetic switches) and Hall effect sensors [Электронный ресурс]. Доступно по ссылке: <https://www.murata.com/en-us/products/sensor/amr/library/basic/difference-hall-ic> (дата обращения: 11.04.2023).
5. Enz C., Vittoz E., Krummenacher F. A CMOS chopper amplifier // IEEE Journal of Solid-State Circuits. 1987. No. 22(3). PP. 335–342.
6. Pastre M., Kayal M., Krummenacher F. A Hall Sensor Analog Front End for Current Measurement With Continuous Gain Calibration // IEEE Sensors Journal. 2007. No. 7(5). PP. 860–867.
7. Heidari H. Current-Mode High Sensitivity CMOS Hall Magnetic Sensors // IEEE Transactions on Circuits and Systems I. 2015. No. 62(5). PP. 1270–1278.
8. Tumanski S. Thin film magnetoresistive sensors. Bristol; Philadelphia: Institute of Physics Pub., 2001. 441 p.
9. Mateosa I., Ramos-Castro J., Lobo A. Low-frequency noise characterization of a magnetic field monitoring system using an anisotropic magnetoresistance // Sensors and Actuators A: Physical. 2015. No. 235. PP. 57–63.



Мы на  YouTube



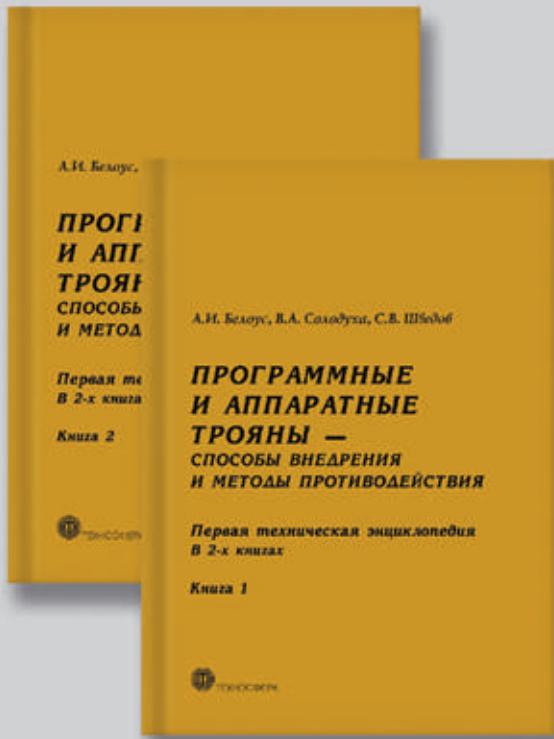
ТЕХНОСФЕРА



Подписывайтесь



# ИЗДАТЕЛЬСТВО «ТЕХНОСФЕРА» ПРЕДСТАВЛЯЕТ КНИГУ:



А.И. Белоус, В.А. Солодуха, С.В. Шведов

## Программные и аппаратные трояны – способы внедрения и методы противодействия. Первая техническая энциклопедия

Под общей редакцией А.И. Белоуса  
В 2-х книгах

### Книга 1

Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2023. – 688 с.  
ISBN 978-5-94836-524-4

### Книга 2

Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2023. – 630 с.  
ISBN 978-5-94836-524-4

Цена 3700 руб.

Впервые в мировой научно-технической литературе в объеме одного комплексного издания последовательно и детально исследован феномен программных и аппаратных троянов, которые фактически являются технологической платформой современного и перспективного информационно-технического оружия (кибероружия). Материал энциклопедии представлен в виде 12 глав.

В первой вводной главе, обобщающей результаты анализа технических возможностей и ограничений современного оружия (атомного, космического, сейсмического, климатического, различных видов СВЧ-оружия), показано, что развитие всех «обычных» и «новейших» видов вооружений дошло до такой стадии, что их реальное использование на практике будет равносильно самоубийству начавшей войну стороны. Осознание этого факта привело к развитию информационно-технического оружия (кибероружия и нейрооружия).

В главе 2 детально исследованы концепции, методы, технические средства и примеры реализации этого вида оружия. В главе 3 рассмотрены основные виды программных троянов, вирусов и шпионских программ, которые в «кибероперациях» обычно действуют солидарно, защищая и помогая друг другу. В главе 4 наглядно показан эволюционный путь развития аппаратных троянов от «ящиков» и «коробочек» до микросхем, приведены примеры их применения в компьютерах, серверах, мобильных телефонах, автомобилях и даже в одежде и обуви человека. В главах с 5-й по 9-ю детально рассмотрены основные типы троянов в микросхемах, принципы их проектирования и работы, способы внедрения, методы их маскировки, выявления в микросхемах, а также защиты и противодействия. В главах с 10-й по 12-ю представлен детальный сравнительный ретроспективный анализ основ государственной политики в США и России в области обеспечения безопасности каналов поставки микросхем.

Книга ориентирована на широкий круг читателей: от инженеров, специалистов по информационной безопасности, чиновников министерств и ведомств до школьников и пенсионеров, активно использующих социальные сети.

### Как заказать наши книги?

По почте: 125319, Москва, а/я 91  
По факсу: (495) 956-33-46  
E-mail: [knigi@technosphera.ru](mailto:knigi@technosphera.ru)  
[sales@technosphera.ru](mailto:sales@technosphera.ru)

ИНФОРМАЦИЯ О НОВИНКАХ  
[www.technosphera.ru](http://www.technosphera.ru)