

**РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ**  
**RADIOELECTRONICS AND INSTRUMENT-MAKING**

УДК 621.396.96  
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-1-98-109>

Поступила в редакцию 13.07.2018  
Received 13.07.2018

**В. К. Железняк<sup>1</sup>, В. Б. Толубко<sup>2</sup>, Л. П. Крючкова<sup>2</sup>, А. П. Провозин<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>*Полоцкий государственный университет, Новополоцк, Беларусь*

<sup>2</sup>*Государственный университет телекоммуникаций, Киев, Украина*

<sup>3</sup>*Научно-исследовательский институт электромеханических приборов, Киев, Украина*

**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ  
В ТЕХНОЛОГИИ RFID С ИНДУКТИВНОЙ СВЯЗЬЮ**

**Аннотация.** Рассмотрена технология радиочастотной идентификации объектов с индуктивной связью, использующая в качестве идентификационных признаков объекта пассивные электрические колебательные контуры, настроенные на фиксированные частоты из рабочего диапазона частот. Выбор первичного измерительного преобразователя и информативного параметра произведен на основании известных из теории радиотехнических цепей результатов анализа системы индуктивно связанных активного и пассивного электрических колебательных контуров. Обоснованы параметры измерительного преобразователя, обеспечивающие выполнение заданных технологическими условиями требований к идентификации и локализации объектов. Рассмотрены факторы, потенциально опасные в отношении снижения информационной надежности измерительного преобразователя, и возможности сведения их влияния до минимума. Сформулированы задачи экспериментальных исследований. Показано, что анализ может производиться путем программной дискретной перестройки первичного измерительного преобразователя и питающего его генератора. При этом задача повышения быстродействия сводится к снижению длительности шага перестройки первичного измерительного преобразователя. Требуемая достоверность идентификации объектов достигается: обеспечением высокой стабильности частот генератора, питающего первичный измерительный преобразователь; точностью и стабильностью настройки первичного измерительного преобразователя на частоты питающего генератора; защитой первичного измерительного преобразователя от влияния помех, создаваемых внешними источниками и другими измерительными преобразователями системы идентификации объектов (электромагнитная совместимость системы идентификации объектов); достаточной величиной отклика первичного измерительного преобразователя на внесение пассивных электрических колебательных контуров; достаточным частотным интервалом настройки пассивных электрических колебательных контуров; точностью и стабильностью настройки пассивных электрических колебательных контуров; стабильностью порога обнаружения относительно начального уровня информативного параметра. Электромагнитная совместимость измерительных преобразователей, чувствительные элементы которых находятся в зоне взаимного влияния, обеспечивается путем синхронизации работы измерительных преобразователей с шунтированием неактивных чувствительных элементов, экранирования, взаимной ориентации и территориального разнеса чувствительных элементов.

**Ключевые слова:** RFID-технология, бесконтактная идентификация, пассивный электрический колебательный контур, измерительный преобразователь

**Для цитирования:** Обоснование параметров измерительного преобразователя в технологии RFID с индуктивной связью / В. К. Железняк [и др.] // Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2019. – Т. 64, № 1. – С. 98–109. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-1-98-109>

**V. K. Zheleznyak<sup>1</sup>, V. B. Tolubko<sup>2</sup>, L. P. Kriuchkova<sup>2</sup>, A. P. Provozin<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>*Polotsk State University, Novopolotsk, Belarus*

<sup>2</sup>*State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine*

<sup>3</sup>*Scientific Research Institute of Electromechanical Devices, Kyiv, Ukraine*

**RATIONALE FOR THE PARAMETERS OF THE MEASURING TRANSDUCER IN RFID TECHNOLOGY  
WITH INDUCTIVE COUPLING**

**Abstract.** In the work the technology of radio-frequency identification of objects with inductive coupling is considered, using passive electric oscillating circuits tuned to fixed frequencies from the working frequency range as identification features of the object. The choice of the primary measuring transducer and the informative parameter is based on the

results of the analysis of the system of inductively coupled active and passive electric oscillation circuits, known from the theory of radio engineering circuits. The parameters of the measuring transducer ensuring the fulfillment of the requirements for identification and localization of objects specified by technological conditions are substantiated. Factors that are potentially dangerous with respect to reducing the information reliability of the measuring transducer are considered, as well as the possibility of reducing their influence to a minimum. The problems of experimental research are formulated. It is shown that the analysis can be performed by software discrete adjustment of the primary measuring transducer and the generator feeding it. In this case, the task of increasing the speed is targeted at decreasing the duration of the step of tuning the primary measuring transducer. The required reliability of object identification is achieved by: ensuring high stability of the frequencies of the generator supplying the primary measuring transducer; accuracy and stability of tuning of the primary measuring transducer to the frequencies of the supplying generator; protection of the primary measuring transducer from the influence of interference generated by external sources and other measuring converters of the object identification system (electromagnetic compatibility of the object identification system); sufficient magnitude of the response of the primary measuring transducer to the introduction of passive electrical oscillation circuits; sufficient frequency tuning interval for passive electric oscillation circuits; accuracy and stability of tuning of passive electric oscillation circuits; stability of the detection threshold relative to the initial level of the informative parameter. Electromagnetic compatibility of measuring transducers, whose sensing elements are in the zone of mutual influence, is provided by synchronizing the operation of measuring transducers with shunting of inactive sensors, screening, mutual orientation and spacing of sensing elements.

**Keywords:** RFID technology, contactless identification, passive electric oscillation circuit, measuring transducer

**For citation:** Zheleznyak V. K., Tolubko V. B., Kriuchkova L. P., Provozin A. P. Rationale for the parameters of the measuring transducer in RFID technology with inductive coupling. *Vesti Natsyyanal' nai akademii navuk Belarusi. Seriya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2019, vol. 64, no. 1, pp. 98–109 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-1-98-109>

**Введение.** В настоящее время во многих областях человеческой деятельности существует потребность в высокоточных системах бесконтактной идентификации и пространственной локализации объектов в закрытых пространствах, например при поиске и отслеживании объектов внутри помещений. При этом широко используемые глобальные навигационные спутниковые системы часто оказываются непригодными для решения такой задачи (особенно при необходимости локализации объектов в подземных помещениях).

Перспективным направлением бесконтактной идентификации и пространственной локализации объектов в закрытых пространствах является применение технологии радиочастотной идентификации (Radio Frequency Identification, RFID). В технологии RFID с индуктивной связью в качестве идентификационных признаков объекта используются пассивные электрические колебательные контуры (ПЭК), настроенные на фиксированные частоты из рабочего диапазона частот. Данные признаки относятся к разряду логических (присутствует или отсутствует конкретный ПЭК на объекте) и при достаточных величине разноса частот настройки ПЭК  $\Delta f_{\text{ПЭК}}$  и разрешающей способности первичного измерительного преобразователя обладают высокой информативностью.

Первичный измерительный преобразователь (ПП) в технологии RFID с индуктивной связью представляет собой электрический колебательный контур, настроенный в резонанс на частоту питающего генератора. Чувствительным элементом ПП является индуктивность, выполненная в виде рамки. В качестве информативного параметра ПП используется энергетический параметр – амплитуда выходного напряжения первичного измерительного преобразователя [1].

Местоположение объектов может определяться путем анализа информации, получаемой распределенными в пространстве измерительными преобразователями от идентификационных признаков объекта.

*Целью данной статьи* является обоснование параметров измерительного преобразователя, обеспечивающих выполнение заданных технологическими условиями требований, анализ факторов, потенциально опасных в отношении снижения информационной надежности измерительного преобразователя, и исследование возможностей сведения их влияния до минимума. При этом под информационной надежностью понимается правильность протекания информационных процессов в измерительном преобразователе в заданном интервале времени при заданных внешних условиях (в том числе при воздействии помех) в предположении полной работоспособности аппаратуры.

**Обоснование параметров измерительного преобразователя.** Главным показателем для оценки качества системы идентификации объектов (СИДО) следует считать достоверность результатов идентификации, выражаемую вероятностью правильного определения идентификационного кода объекта. Правомерность вероятностного подхода при оценке качества СИДО объясняется случайным характером процессов, происходящих при идентификации, когда вследствие влияния дестабилизирующих факторов и случайных внешних возмущений изменяются параметры как измерительных средств, так и самих идентификационных признаков объектов. Результаты идентификации при этом рассматриваются как случайные события, с определенной вероятностью соответствующие реальным идентификационным признакам объектов.

Важнейшей составной частью СИДО, предопределяющей параметры системы в целом, является ПП. Исходя из требований к СИДО [2], ПП должен иметь высокое быстродействие, чувствительность к первичному информативному параметру и стабильность характеристик в условиях воздействия дестабилизирующих факторов. Указанные характеристики тесно взаимосвязаны, причем улучшение одной, как правило, приводит к ухудшению других. Так, повышение точности измерения информативного параметра ведет к снижению быстродействия, и наоборот, при повышении быстродействия ПП снижается точность измерения. В связи с этим необходимо решать компромиссную задачу выбора оптимальных соотношений данных параметров. Следует также отметить, что вопрос точности измерения – категория экономическая: чем точнее измеряется информативный параметр, тем эффективнее полученная информация может быть использована, однако стоимость ее получения возрастает.

Анализ опубликованных работ позволяет выделить два основных направления совершенствования характеристик измерительных преобразователей. Цель первого (технологического) – построение преобразователей путем создания чувствительных элементов с высоким быстродействием, чувствительностью к измеряемой величине и стабильностью характеристик. Второе направление (кибернетическое) предусматривает разработку структурных схем, обеспечивающих высокие метрологические характеристики даже при использовании инерционных чувствительных элементов с характеристиками, нестабильными во времени и изменяющимися при воздействии параметров окружающей среды. Оба направления актуальны и взаимно дополняют друг друга.

При идентификации объектов используются квазидетерминированные сигналы – сигналы с известным характером закона изменения, но неизвестным по значению одним или несколькими параметрами (серый ящик). Известно [3], что информация, получаемая в результате измерения, определяется степенью согласованности вероятностных свойств измерительного преобразователя и измеряемой величины, которую принято характеризовать эквивалентным числом надежно различаемых преобразователем уровней измеряемой величины  $N$ . Поэтому для достоверной идентификации объектов необходимо обеспечить наиболее высокую степень согласованности вероятностных свойств ПП и измеряемой величины.

Следует отметить, что при улучшении качества преобразователя точность измерения возрастает не беспредельно, а до величины, определяемой дисперсией самого информативного параметра [3]. Поэтому информативность признака определяется как качеством принятого ПП, так и свойствами информативного параметра.

**Обоснование информативного параметра.** Схема взаимодействия ПП и ПЭЖ в технологии RFID с индуктивной связью представлена на рис. 1. Математическую модель процесса взаимодействия ПП с ПЭЖ объекта можно представить следующим образом [1]:

$$\dot{U} = \dot{E} \frac{\left( r_1 + \frac{\omega^2 M^2}{|Z_2|^2} r_2 \right) + j \left( x_{L_1} - \frac{\omega^2 M^2}{|Z_2|^2} x_2 \right)}{\left( r_1 + \frac{\omega^2 M^2}{|Z_2|^2} r_2 \right) + j \left( x_1 - \frac{\omega^2 M^2}{|Z_2|^2} x_2 \right)}, \quad (1)$$

где  $\dot{E}$  – источник э.д.с.;  $r_1$  и  $r_2$  – собственные потери в контуре источника поля и ПЭК;  $Z_2 = r_2 + j\left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2}\right)$  – комплексное сопротивление контура ПЭК;  $\omega$  – круговая частота источника э.д.с.  $\dot{E}$ ;  $M$  – коэффициент взаимной индукции между катушками  $L_1$  и  $L_2$ ;  $x_1$  и  $x_2$  – реактивные сопротивления контуров источника поля и ПЭК;  $x_{L_1}$  – реактивное сопротивление источника поля  $L_1$ .

Максимальный радиус считывания  $R$  ограничивается величиной ближней зоны электромагнитного поля [2]:  $R < \lambda/2\pi$ , где  $\lambda$  – длина волны электромагнитного поля, создаваемого источником поля.

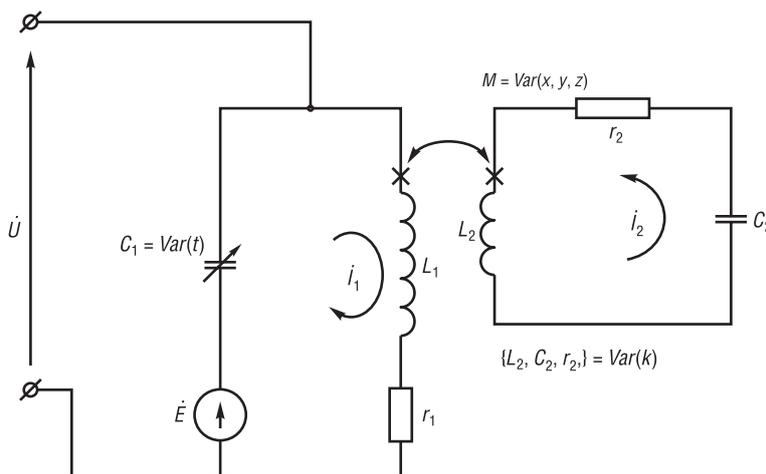


Рис. 1. Схема взаимодействия контура источника поля (ПП) и ПЭК:  $L_1$  – источник поля;  $L_1C_1$  – контур источника поля;  $\dot{E}$  – генератор напряжения, питающий контур источника поля;  $L_2C_2$  – ПЭК;  $\dot{U}$  – информативный параметр;  $M$  – коэффициент взаимной индукции между катушками  $L_1$  и  $L_2$ ;  $x, y, z$  – координаты внесения ПЭК;  $k$  – поле значений частот настройки ПЭК

Fig. 1. Scheme of interaction of the source field outline (primary converter) and passive electric oscillatory circuit (PEC):  $L_1$  – the source of the field;  $L_1C_1$  – the field source outline;  $\dot{E}$  – voltage generator, feeding the field source outline;  $L_2C_2$  – PEC;  $\dot{U}$  – the informative parameter;  $M$  – the coefficient of mutual induction between the coils  $L_1$  and  $L_2$ ;  $x, y, z$  – the coordinates of the PEC application;  $k$  – the field of the frequency values of the PEC setting

Анализ выражения (1) показывает, что изменение напряжения на источнике поля определяется изменением знаменателя. Увеличение активного сопротивления контура источника поля приводит к уменьшению напряжения на источнике поля  $L_1$ . Следовательно, по уменьшению напряжения на источнике поля  $\dot{U}$ , вызванному увеличением необратимых потерь энергии, можно судить о наличии на объекте ПЭК, частота настройки которого совпадает с частотой поля.

Очевидно, что для обеспечения достоверного определения частот настройки, закрепленных на объекте ПЭК, необходимо обеспечить достаточно эффективную связь катушки ПЭК с чувствительным элементом.

Отбор энергии пассивным контуром, а значит, и уменьшение напряжения на источнике поля тем значительнее, чем больше связь между чувствительным элементом и катушкой ПЭК и чем меньше собственные потери в контуре источника поля  $r_1 = \rho_1/Q_{1эКВ}$  и ПЭК  $r_2 = \rho_2/Q_2$  ( $\rho_1$  и  $\rho_2$  – волновое сопротивление соответственно ПП и ПЭК,  $Q_{1эКВ}$  и  $Q_2$  – добротность соответственно ПП и ПЭК).

Ближние поля электромагнитных излучателей имеют сложную пространственную структуру [4], поэтому теоретический анализ волновых процессов вблизи излучателей производится путем компьютерного моделирования излучателей с заданными размерами при заданной длине волны.

Нами были определены пространственные распределения поля чувствительного элемента ПП [1] (рис. 2).

В силу того, что отклик ПЭК выражается в виде необратимых потерь энергии генерируемых колебаний, поле излучения ПП, также выражающееся в необратимых потерях энергии ПП, должно быть сведено к минимуму.

**Временные параметры ПП.** Для обеспечения необходимой информационной емкости СИДО в зоне идентификации необходимо создать электромагнитное поле, содержащее колебания всех фиксированных ( $k$ ) частот настройки ПЭК, и обеспечить анализ взаимодействия этого поля с ПЭК объекта.

Как известно [5], частотный анализ может выполняться параллельным или последовательным методом. Иногда используются различные сочетания этих методов (комбинированные методы).

Суть параллельного частотного анализа состоит в том, что все частотные составляющие в определенной полосе частот (полосе обзора) определяются одновременно. Осуществляется такой анализ путем использования большого количества резонаторов со смещенными резонанс-

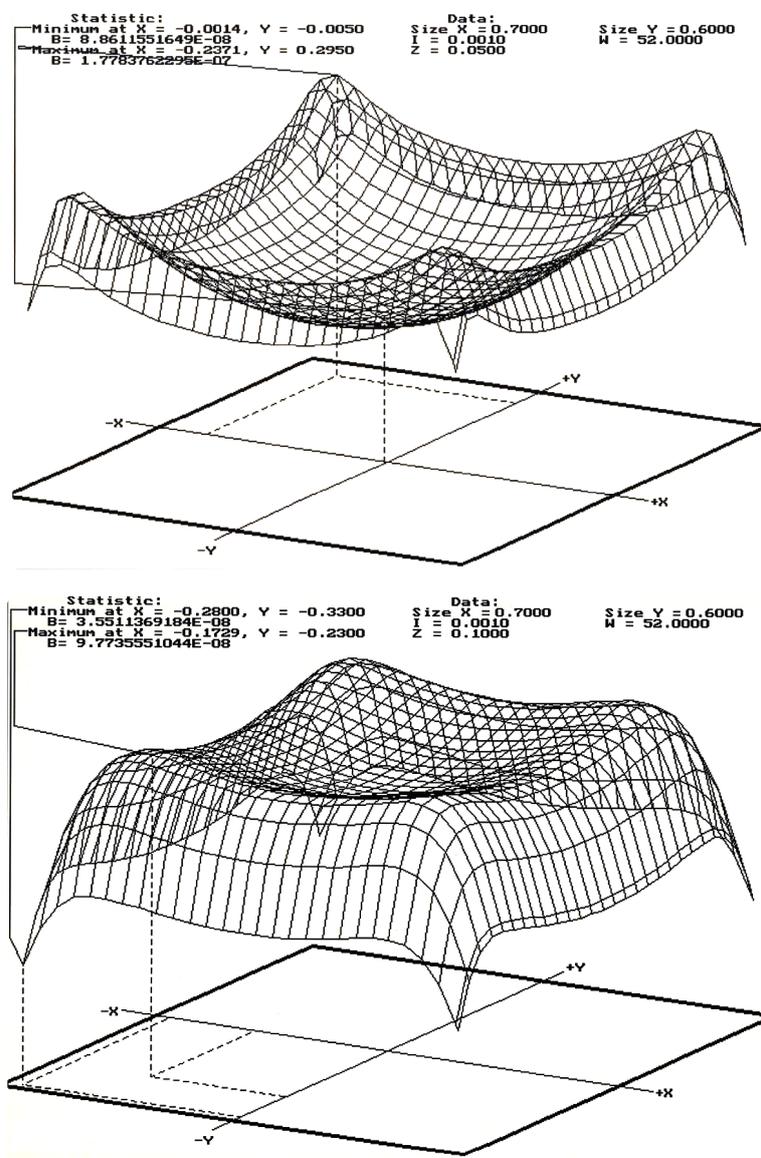


Рис. 2. Фрагменты пространственного распределения поля чувствительного элемента ПП

Fig. 2. Fragments of the spatial distribution of the field of the sensitive element of the primary converter

ными частотами. Все элементы кодирования объекта при данном методе анализа могут быть определены практически мгновенно, однако размеры зоны размещения источников поля в пространстве не удовлетворяют требованию локализации объектов.

Суть последовательного частотного анализа состоит в том, что элементы кодирования объекта в определенной полосе обзора определяются поочередно (последовательно). Для осуществления такого анализа достаточно одного резонатора, однако необходимо обеспечить его последовательную перестройку в полосе обзора. Процесс фиксации результатов анализа должен быть согласован по времени с перестройкой ПП и питающего его генератора. Способ перестройки ПП определяет структуру измерительного преобразователя СИДО.

Для обеспечения необходимого быстродействия СИДО перестройка ПП даже в широких пределах изменения его параметров должна осуществляться за минимально возможное время. В связи с тем что фиксированные частоты настройки ПЭК заведомо известны, анализ может производиться путем программной дискретной перестройки ПП и питающего его генератора. Возбуждение колебаний в ПП независимым источником обеспечивает функциональную устойчивость системы ПП – ПЭК.

Программная дискретная перестройка ПП обеспечивается выбором и подключением к чувствительному элементу дискретного конденсатора  $C_1$  (см. рис. 1), необходимого для настройки ПП в резонанс на частоту питающего генератора. Вследствие того что в качестве информативного параметра выбран энергетический параметр – амплитуда выходного напряжения ПП, длительность шага перестройки должна быть большей времени установления начальной амплитуды колебаний в ПП [5], а время переходных процессов, возникающих при перестройке ПП, должно быть исключено из анализа.

Так как в основе работы рассмотренного ПП лежит явление резонанса, его разрешающая способность, под которой понимают способность преобразователя различать две соседние частотные составляющие спектра, в итоге будет обуславливаться параметрами ПП и методом частотного анализа. Количественно разрешающая способность ПП может быть определена как минимальный интервал по частоте между двумя ПЭК, при котором ПП способен их различить.

При последовательном анализе разрешающая способность определяется динамической характеристикой резонансной системы [5]. Чем шире динамическая характеристика, тем ниже разрешающая способность. Очевидно, что пассивные электрические контуры, частотный интервал между которыми меньше ширины динамической характеристики ПП, не могут быть выявлены.

Ширина динамической характеристики (динамическая полоса пропускания) зависит от формы и ширины статической резонансной кривой и скорости изменения частоты (скорости анализа) [5]. Таким образом, частотный интервал настройки ПЭК и, следовательно, диапазон рабочих частот измерительного преобразователя определяются добротностью ПП и скоростью анализа.

В связи с тем что момент попадания объекта в зону чувствительности ПП является случайным, одного цикла перестройки ПП в диапазоне рабочих частот недостаточно для его идентификации. Следовательно, алгоритм работы измерительного преобразователя СИДО должен предусматривать, как минимум, два цикла перестройки ПП. Время идентификации объекта  $t_{ид.}$  при этом определяется как сумма длительностей шагов перестройки  $t_{ш.п.}$  двух полных циклов «пробега» диапазона рабочих частот

$$t_{ид.} = 2T_{ц} = 2kt_{ш.п.} \quad (2)$$

Очевидно, что длительность шага перестройки существенно влияет на время идентификации объекта. Поэтому задача повышения быстродействия измерительного преобразователя сводится к снижению длительности шага перестройки ПП.

Анализ переходных процессов в перестраиваемой колебательной системе (см. рис. 1) показывает, что на скорость перестройки данного ПП влияют следующие факторы: быстродействие управляющего элемента; динамические свойства ПП; способ перестройки ПП.

Уменьшение длительности шага перестройки  $t_{ш.п.}$  определяется (при условии применения электронных ключей) продолжительностью переходных процессов в ПП. Следует отметить, что кроме быстродействия к электронным ключам предъявляются требования малости активного сопротивления в открытом состоянии и емкости в закрытом состоянии.

Известно [5], что скорость нарастания тока в контуре зависит от полосы пропускания. Чем полоса пропускания больше, тем быстрее растет амплитуда тока и устанавливается стационарный режим. Наоборот, в колебательной системе с узкой полосой пропускания (добротность контура велика) переходные процессы продолжительны и амплитуда колебаний тока при включении источника нарастает медленно.

Таким образом, для уменьшения времени переходных процессов необходимо использовать ПП с малой добротностью. В то же время малая добротность ПП приводит к снижению величины его отклика на внесение ПЭК. Решение данного противоречия достигается демпфированием ПП на время переходных процессов.

**Уровень порога обнаружения ПЭК.** Задача сравнения информативного параметра с его контролируемым значением обуславливает наличие в структуре измерительного преобразователя компаратора и необходимого для его работы амплитудного детектора. Для уменьшения мешающего влияния переходных процессов на информативный параметр необходимо повышать постоянную времени нагрузки амплитудного детектора, что также накладывает ограничение на частоту импульсов коммутации и, следовательно, на быстродействие системы. Одним из путей решения данной проблемы является принудительное обнуление емкости детектора. Этим достигается необходимое быстродействие измерительного преобразователя при практически идеально сглаженных пульсациях информативного параметра (рис. 3).

ПЭК «срабатывает», когда остаточное значение информативного параметра достигает контролируемого уровня.

Зона выбора контролируемого уровня информативного параметра, задающегося опорным (пороговым) значением напряжения компаратора  $U_{п}$ , ограничивается зоной неустойчивости начального значения информативного параметра ПП (рис. 4). Следовательно, требование «срабатывания» ПЭК на расстоянии

$$U_{ост.} |_{z_{обн.}} < U_{п} \quad (3)$$

должно удовлетворяться путем обеспечения достаточной величины отклика ПП на внесение ПЭК (зона остаточного значения информативного параметра, см. рис. 3).

На практике параметры основных стационарных средств измерительного преобразователя можно считать детерминированными. К ним относятся: питающее напряжение; пороговое напряжение; электрические параметры входящих в систему физических элементов (резисторы, конденсаторы, микросхемы и т. д.).

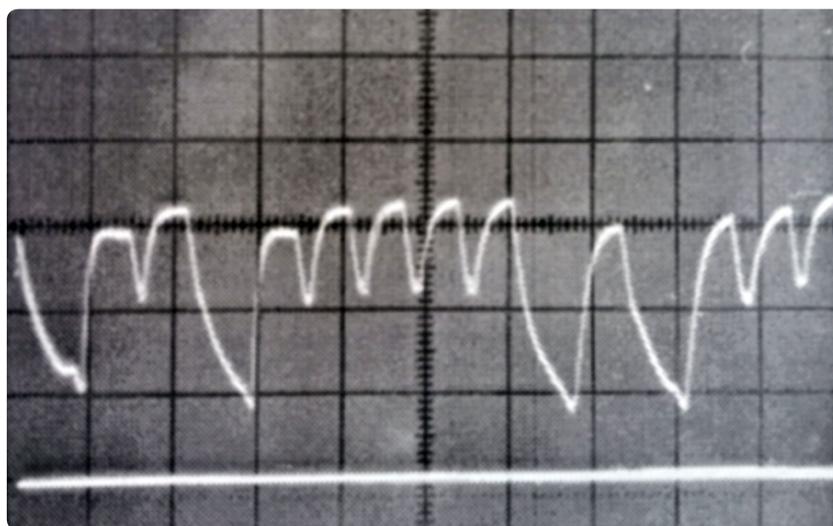


Рис. 3. Фотография осциллограммы начальных и остаточных значений информативного параметра на выходе детектора. Вторым лучом отмечен уровень нуля  
Fig. 3. The photograph of the oscillogram of the informative parameter initial and residual values at the detector output. The second beam marks the zero level

Тем не менее при взаимодействии чувствительного элемента и ПЭК информативный параметр носит случайный характер. Это вызвано тем, что, с одной стороны, имеет место разброс значений центральных частот настройки, добротностей и характеристик полей взаимодействия чувствительного элемента и ПЭК, а с другой – воздействие внешних электромагнитных полей на зону взаимодействия.

В результате выбор параметров измерительного преобразователя, равно как и расчет его информационной надежности (достоверности опознания), должен производиться на основе вероятностной модели, которая учитывает случайный характер процессов, имеющих место при опознавании. Для построения такой модели процесс опознавания целесообразно представить как задачу принятия статистических решений в соответствии с некоторым оптимальным в заданном смысле критерием [6].

При использовании в качестве элементов кодирования объектов пассивных электрических колебательных контуров и программной перестройке первичного измерительного преобразователя информация о состоянии идентификационного признака представляется в дискретной форме «1» – «0», указывая соответственно на нахождение идентификационного признака в состояниях  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$  (находится или отсутствует конкретный ПЭК на объекте). Состояния  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$  идентификационного признака не могут быть достоверно предсказаны заранее, поэтому можно считать, что они соответствуют гипотезам  $H_1$  и  $H_2$  о нахождении идентификационного признака в состояниях  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$ .

Таким образом, задачей измерительного преобразователя является отождествление каждой конкретной реализации идентификационного признака с состоянием  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$  идентификационного признака, то есть установление истинности гипотез  $H_1$  и  $H_2$ .

В двухальтернативной ситуации принятие решений всегда сопровождается ошибками двух родов [6]:

ошибка первого рода (ложная тревога) – гипотеза  $H_1$  отвергается тогда, когда в действительности она верна;

ошибка второго рода (пропуск цели) – отвергается гипотеза  $H_2$ , в то время как она верна.

Указанные ошибочные решения характеризуются соответственно вероятностями  $P_{\text{ош.1}}$  и  $P_{\text{ош.2}}$ . Принятие правильных решений о состояниях идентификационного признака при нахождении его в состояниях  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$  характеризуется соответственно вероятностями  $P_{\text{в1}}$  и  $P_{\text{в2}}$ , причем  $P_{\text{в1}} + P_{\text{ош.1}} = 1$  и  $P_{\text{в2}} + P_{\text{ош.2}} = 1$ , поскольку возможные исходы, соответствующие каждому из состояний идентификационного признака, составляют полную группу событий.

Обобщенно измерительный преобразователь может быть представлен в виде двух функциональных частей: первичного измерительного преобразователя и решающего устройства. Первичный измерительный преобразователь обладает аналоговой статической характеристикой и осуществляет преобразование значений опознавательного признака в некоторый выходной электрический сигнал  $U$ .

Задачей решающего устройства является отождествление случайного значения (реализации) выходного сигнала первичного измерительного преобразователя с одним из состояний идентификационного признака в соответствии с введенным в решающее устройство критерием  $K$  (правилом принятия решения). Из двух гипотез  $H_1$  и  $H_2$  решающее устройство выбирает ту, которая в заданном смысле предпочтительнее. В качестве критерия принятия решения может быть

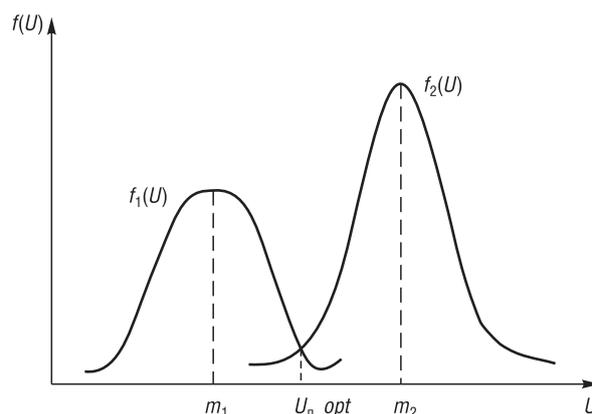


Рис. 4. Графики условных плотностей распределения информативного параметра:  $f_1(U)$  – условная плотность распределения остаточного значения информативного параметра,  $f_2(U)$  – условная плотность распределения начального значения информативного параметра

Fig. 4. Graphs of conditional densities of the informative parameter distribution:  $f_1(U)$  – the conditional density of the distribution of the informative parameter residual value:  $f_2(U)$  – the conditional density of the distribution of the informative parameter initial value

выбран критерий «идеального наблюдателя» (критерий Котельникова), являющийся частным случаем критерия минимального среднего риска Байеса. Указанный критерий минимизирует вероятность суммарной ошибки принятия решения

$$P_{\text{ош.}} = P_a(\Pi_1) \int_{U_n}^{\infty} f_1(U) dU + P_a(\Pi_2) \int_{-\infty}^{U_n} f_2(U) dU, \quad (4)$$

где  $P_a(\Pi_1)$  и  $P_a(\Pi_2)$  – априорные вероятности нахождения опознавательного признака в состояниях  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$  (находится или отсутствует конкретный ПЭЖ на объекте);  $f_1(U)$  и  $f_2(U)$  – функции плотностей вероятностей случайных значений информативного параметра ПП, соответствующих состояниям  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$  идентификационного признака (см. рис. 4);  $U_n$  – порог принятия решения решающего устройства.

Достоинством данного критерия является возможность отдельного учета вероятностей ошибок первого и второго рода, определяемых выражениями:

$$P_{\text{ош.1}} = \int_{U_n}^{\infty} f_1(U) dU, \quad (5)$$

$$P_{\text{ош.2}} = \int_{-\infty}^{U_n} f_2(U) dU, \quad (6)$$

что является весьма важным, поскольку в общем случае вероятности этих ошибок могут существенно различаться. Кроме того, аналитическое выражение для критерия таково, что в него могут быть введены величины, характеризующие как параметры случайных значений информативного параметра, так и основные параметры решающего устройства. Это позволяет произвести их рациональный выбор и определить точностные характеристики, обеспечивающие максимальную или заданную достоверность результатов идентификации.

Определение состояния идентификационного признака сводится в данном случае к выбору порогового значения  $U_n$ , находящегося между двумя пиковыми значениями  $f_1(U)$  и  $f_2(U)$  (см. рис. 4). Тогда, если при функционировании ПП будет определено значение информативного параметра  $U$  такое, что  $U < U_n$ , будет принято решение о том, что ПЭЖ с данной частотой настройки находится на объекте, в противном случае – что он отсутствует.

Порог обнаружения для каждого конкретного набора параметров СИДО, синтезированных и практически эксплуатируемых, будет индивидуальным для каждой из систем. Разброс пороговых напряжений от системы к системе станет тем меньшим, чем меньшими окажутся разбросы значений параметров ингредиентов систем. Поскольку при получении данных исходным аппаратным информативным параметром является продетектированное напряжение на выходе чувствительного элемента, а соотношение между его максимальным и минимальным значениями определяется, главным образом, свойствами чувствительного элемента и ПЭЖ, включая динамику их пространственного расположения, при выборе оптимального порога оказывается достаточным иметь только два распределения. Первое из них характеризует поведение начального уровня информативного параметра  $f_2(U)$ , а второе – поведение остаточного уровня информативного параметра  $f_1(U)$  (см. рис. 4).

Оптимальность определения состояния опознавательного признака при условии распределения начальных и остаточных значений информативного параметра по нормальному закону обеспечивает значение [7]

$$U_n = \frac{\sigma_2^2 m_1 - \sigma_1^2 m_2 \pm \sigma_1 \sigma_2 \sqrt{(m_2 - m_1)^2 + (\sigma_2^2 - \sigma_1^2) \ln(\lambda_0^2 \sigma_2^2 / \sigma_1^2)}}{\sigma_2^2 - \sigma_1^2}, \quad (7)$$

где  $\lambda_0 = \frac{P_a(\Pi_1)(c_{12} - c_{11})}{P_a(\Pi_2)(c_{21} - c_{22})}$  – пороговое (критическое) значение коэффициента правдоподобия,

обеспечивающее минимальные потери при идентификации;  $c_{11}$  и  $c_{22}$  – потери при правильных решениях;  $c_{12}$  и  $c_{21}$  – потери при ошибочных решениях.

При этом должны быть обеспечены такие параметры распределений начального и остаточного значений информативного параметра  $m_1, \sigma_1$  и  $m_2, \sigma_2$ , при которых достигается требуемая вероятность правильной идентификации объектов.

Решение задачи аналитического описания параметров распределения начальных и остаточных значений информативного параметра на полях значений параметров носителей кодов, ПП, геометрии взаимодействия чувствительного элемента с элементами кодирования объекта не представляется возможным из-за отсутствия статистик распределения указанных параметров. Поэтому целесообразно воспользоваться экспериментально полученными статистиками результирующих начального и остаточного значений информативного параметра и ограничиться нахождением такой совокупности параметров ПП, ПЭК и решающего устройства, приемлемой с точки зрения возможности их реализации, которая обеспечивала бы требуемую достоверность идентификации.

Указанные статистики могут быть получены как в лабораторных, так и в реальных условиях эксплуатации экспериментальных образцов СИДО. Важным является набор статистик на множестве ПЭК, множестве ПП и множестве носителей кодов объектов.

Анализ рассмотренного метода идентификации показывает, что нестабильность начального уровня информативного параметра обуславливается: нестабильностью частот генератора, питающего ПП; неточностью и нестабильностью настройки ПП на частоты питающего генератора; влиянием оборудования на ПП; взаимным влиянием ПП системы.

Разброс остаточного значения информативного параметра обуславливается, помимо перечисленных факторов, неточностью и нестабильностью настройки ПЭК.

Так как достоверность идентификации определяется стабильностью положения уровня порога обнаружения относительно начального уровня первичного информативного параметра, необходимо, чтобы порог обнаружения отслеживал изменения начального уровня информативного параметра.

Таким образом, для достижения требуемой достоверности идентификации необходимо обеспечить: высокую стабильность частот генератора, питающего ПП; точность и стабильность настройки ПП на частоты питающего генератора; защиту ПП от влияния помех, создаваемых оборудованием и другими ПП СИДО (электромагнитная совместимость СИДО); достаточную величину отклика ПП на внесение ПЭК; достаточный частотный интервал настройки ПЭК; точность и стабильность настройки ПЭК; стабильность порога обнаружения относительно начального уровня информативного параметра.

Электромагнитная совместимость измерительных преобразователей СИДО, чувствительные элементы которых находятся в зоне взаимного влияния, может быть обеспечена рядом технических, технологических и организационных мер, например, путем синхронизации работы измерительных преобразователей с шунтированием неактивных чувствительных элементов, экранирования, взаимной ориентации и территориального разнесения чувствительных элементов.

В результате проведенных исследований определены следующие задачи дальнейших (экспериментальных) исследований:

определение статистических характеристик распределения начального и остаточного значений информативного параметра и нахождение оптимального по достоверности идентификации порога обнаружения ПЭК;

определение статистических функций распределения расстояния обнаружения ПЭК;

установление адекватности теоретически определенных информационных параметров СИДО статистикам экспериментальных распределений.

**Заключение.** Установлено, что величина отклика ПП на внесение ПЭК определяется эквивалентной добротностью ПП, добротностью ПЭК и величиной взаимной индуктивности между катушками индуктивности ПП и ПЭК.

Оперативная автоматическая оценка правильности идентификации объекта обеспечивается путем кодирования объекта одинаковым числом пассивных контуров и контроля числа откликов ПП при идентификации объекта; информационная емкость системы при этом определяется

числом сочетаний принятого числа пассивных контуров на объекте из принятого числа фиксированных частот настройки пассивных контуров.

При реализации последовательного анализа переходные процессы, возникающие при перестройке ПП, существенно искажают вид его резонансной характеристики, поэтому время переходных процессов должно быть исключено из анализа.

Демпфирование ПП на время переходных процессов при перестройке существенно уменьшает продолжительность переходных процессов и, следовательно, время идентификации без снижения величины отклика ПП на внесение пассивных контуров.

Принудительное стробированное обнуление емкости детектора повышает быстродействие ПП при практически идеально сглаженных пульсациях информативного параметра.

Применение следящего порога обнаружения повышает достоверность опознавания при воздействии дестабилизирующих факторов в условиях эксплуатации.

Оптимальность основных параметров носителей идентификационных признаков и ПП по критерию «максимум достоверности опознавания – минимум времени измерения» достигается вариабельностью значений рабочей частоты, эквивалентной добротности элементов системы, пространственной зоны чувствительности и порога обнаружения для фиксированных распределений вероятностей неустойчивости начального, контролируемого и остаточного значений информативного параметра.

### Список использованных источников

1. Крючкова, Л. П. Дослідження просторових характеристик ближнього поля рамкових антен / Л. П. Крючкова // Сучасний захист інформації. – 2018. – № 1. – С. 17–22.
2. Дшхунян, В. Л. Электронная идентификация. Бесконтактные электронные идентификаторы и смарт-карты / В. Л. Дшхунян, В. Ф. Шаньгин. – М.: АСТ : НТ Пресс, 2004. – 695 с.
3. Орнатский, П. П. Теоретические основы информационно-измерительной техники. – 2-е изд. – Київ: Вища школа. Головн. изд-во, 1983. – 455 с.
4. Електродинаміка та поширення радіохвиль. Ч. 2. Випромінювання та поширення електромагнітних хвиль : підручник для студентів ВНЗ / В. М. Шокало [та ін.]. – Харків: ХНУРЕ : Колегіум, 2010. – 435 с.
5. Мартынов, В. А. Панорамные приемники и анализаторы спектра / В. А. Мартынов, Ю. И. Селихов; под ред. Г. Д. Заварина. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Совет. радио, 1980. – 352 с.
6. Тихонов, В. И. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем: учеб. пособие для вузов / В. И. Тихонов, В. Н. Харисов. – М.: Радио и связь, 1991. – 608 с.
7. Генкин, В. Л. Системы распознавания автоматизированных производств / В. Л. Генкин, И. Л. Ерош, Э. С. Москалев. – Л.: Машиностроение. Ленинград. отд-ние, 1988. – 246 с.

### References

1. Krychkova L. P. Research of the spatial characteristics of the near field of frame antennas. *Sovremennaya zashchita informatsii* [Modern Information Security], 2018, no. 1, pp. 17–22 (in Ukrainian).
2. Dshkhunyan V. L., Shan'gin V. F. *Electronic Identification. Contactless Electronic Identifiers and Smart Cards*. Moscow, AST Publ., NT Press Publ., 2004. 695 p. (in Russian).
3. Ornatskii P. P. *Theoretical Foundations of Information and Measuring Equipment*. Kiev, Vishcha shkola Publ., 1983. 455 p. (in Russian).
4. Shokalo V. M., Pravda V. I., Usin V. A., Vuntsemeri V. S., Gretsikh D. V. *Electrodynamics and the Propagation of Radio Waves. Part 2. Radiation and Propagation of Electromagnetic Waves*. Kharkiv, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kolegium Publ., 2010. 435 p. (in Ukrainian).
5. Martynov V. A., Selikhov Yu. I., Zavarin G. D. (ed.). *Panoramic Receivers and Spectrum Analyzers*. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1980. 352 p. (in Russian).
6. Tikhonov V. I., Kharisov V. N. *Statistical Analysis and Synthesis of Radio Devices and Systems*. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1991. 608 p. (in Russian).
7. Genkin V. L., Erosh I. L., Moskalev E. S. *Recognition Systems for Automated Productions*. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1988. 246 p. (in Russian).

### Информация об авторах

*Железняк Владимир Кириллович* – доктор технических наук, профессор, профессор Полоцкого государственного университета (ул. Блохина, 30, 211440, Новополоцк, Республика Беларусь). E-mail: zheleznjak@psu.by

*Толубко Владимир Борисович* – доктор технических наук, профессор, ректор Государственного университета телекоммуникаций (ул. Соломенская, 7, 03110, Киев, Украина). E-mail: 090289@ukr.net

*Крючкова Лариса Петровна* – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Системы информационной и кибернетической защиты», Государственный университет телекоммуникаций (ул. Соломенская, 7, 03110, Киев, Украина). E-mail: alara54@ukr.net. <http://orcid.org/0000-0002-8509-6659>

*Провозин Александр Петрович* – заместитель председателя правления, Публичное акционерное товарищество «Научно-исследовательский институт электромеханических приборов» (ул. Академика Крымского, 27, 03680, Киев, Украина). E-mail: pap30151@gmail.com

### Information about the authors

*Vladimir K Zheleznyak* – D. Sc. (Engineering), Professor, Professor of Polotsk State University (30, Blokhin Str., Novopolotsk, 211440, Vitebsk region, Republic of Belarus). E-mail: v.zheleznjak@psu.by

*Vladimir B. Tolubko* – D. Sc. (Engineering), Professor, Rector of the State University of Telecommunications (7, Solomenskaya Str., Kyiv, 03110, Ukraine). E-mail: 090289@ukr.net

*Larisa P. Kriuchkova* – D. Sc. (Engineering), Associate Professor, Professor of the Department of Information and Cyber Security Systems, State University of Telecommunications (7, Solomenskaya Str., Kyiv, 03110, Ukraine). E-mail: alara54@ukr.net. <http://orcid.org/0000-0002-8509-6659>

*Aleksandr P. Provozin* – Deputy Chairman of the Board, Public Joint Stock Company “Scientific Research Institute of Electromechanical Devices” (27, Academician Crimsky Str., Kyiv, 03680, Ukraine). E-mail: pap30151@gmail.com