

УДК 004.056 / 681.89

АНАЛИЗ МАГНИТОСТРИКЦИОННОГО АКУСТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ КАК ИСТОЧНИКА ОПАСНОГО ИНФОРМАТИВНОГО СИГНАЛА

Сагдеев К.М., Сагдеева Е.К., Лохов В.И.

ФГАОУ ВПО «Северо-Кавказский федеральный университет», Ставрополь, e-mail: info@ncfu.ru

В статье рассматривается научная задача, связанная с проблемой предотвращения утечки конфиденциальной речевой информации по акустоэлектрическим каналам. В работе проведен анализ физических процессов магнитоэлектрического преобразования, принципов построения и работы магнитоупругих датчиков. Сформулированы условия, при которых возможно линейное преобразование механических деформаций, создаваемых акустическим сигналом, в колебания напряжения на выходе магнитоупругого датчика. Разработана математическая модель, позволяющая оценить опасность возникновения акустоэлектрического канала утечки информации за счет магнитоэлектрического эффекта. Модель устанавливает взаимосвязь между акустическим давлением речевого сигнала и напряжением опасного сигнала на выходе преобразователя. Уточнена формула для коэффициента электромеханической связи магнитоэлектрического преобразователя. Установлена потенциальная чувствительность для магнитоэлектрических преобразователей дроссельного типа. Проведена оценка угрозы утечки речевой информации по акустоэлектрическому каналу за счет магнитоэлектрического эффекта. Результаты работы рекомендуется использовать для оценки наличия опасного акустоэлектрического преобразования в технических системах.

Ключевые слова: магнитоэлектрический эффект, магнитоэлектрический акустоэлектрический преобразователь, магнитоупругий датчик, акустоэлектрический канал утечки информации, математическая модель

ANALYSIS OF MAGNETOSTRICTIVE ACOUSTOELECTRIC TRANSDUCER AS A SOURCE OF THREAT INFORMATIVE SIGNAL

Sagdeev K.M., Sagdeeva E.K., Lokhov V.I.

North-Caucasian Federal University, Stavropol, e-mail: info@ncfu.ru

The article considers the task associated with the scientific problem of preventing leakage of confidential speech information through acoustoelectric channels. In the work the analysis of physical processes magnetostrictive conversion, principles of construction and operation of magnetoelastic sensors. Formulated the conditions under which there is a linear transformation of mechanical deformation, generated by an audio signal in the fluctuations of the output voltage of the magnetoelastic sensors. The developed mathematical model allows to assess the risk of acoustoelectric channel of information leakage due to the magnetostrictive effect. Clarifying formulas for the coefficient of Electromechanical coupling from the magnetostrictive transducer. The evaluation of the threat of leakage of speech information through the acoustoelectric channel due to the magnetostrictive effect.

Keywords: magnetostriction effect, elastic magnetic sensor, magnetostrictive acoustoelectric transducer, acoustoelectric channel of information leakage, mathematical model

Современные объекты информатизации для обеспечения деятельности основных технических средств и систем (ОТСС), предназначенных для обработки, хранения и передачи информации, всесторонне оснащаются вспомогательными техническими средствами и системами (ВТСС), соединительные линии которых выходят за пределы выделенных помещений. ОТСС и ВТСС содержат в своем составе различные акустоэлектрические преобразователи (АЭП), что способствует возникновению акустоэлектрических технических каналов утечки информации (ТКУИ). Следовательно, оценка потенциальной опасности образования ТКУИ за счет эффекта акустоэлектрического преобразования является актуальной научной задачей, имеющей практическую направленность.

Из перечня известных акустоэлектрических преобразований особый интерес представляют магнитоэлектрические АЭП. Это

вызвано противоречивой оценкой их возможностей. Так в работах [2, 8, 9] отмечается, что магнитоэлектрические АЭП могут выступать в качестве источников опасных информативных сигналов и, следовательно, способствовать образованию ТКУИ, однако степень опасности этих преобразователей не приводится. Тогда как из работ [3, 6] следует, что магнитоэлектрические (магнитоупругие) датчики обладают очень низкой чувствительностью, поэтому используются для измерения большого давления. Таким образом, целью работы является оценка потенциальных возможностей магнитоэлектрических преобразователей как источников опасных сигналов.

Для достижения поставленной цели в работе решены следующие частные задачи:

– проведен анализ физических процессов магнитоэлектрического преобразования, принципов построения и работы магнитоупругих датчиков;

– разработана математическая модель для оценки опасности возникновения акустоэлектрического канала утечки информации за счет магнитострикционного эффекта.

Анализ физических процессов магнитострикционного преобразования, принципов построения и работы магнитоупругих датчиков

Физически прямой магнитострикционный эффект состоит в том, что под действием достаточно сильного магнитного поля происходит перестройка доменной структуры ферромагнитного материала, в результате за счет намагниченности кристаллической решетки возникает внутреннее механическое напряжение, для компенсации которого ферромагнетик (магнитостриктор) вынужден деформироваться. На практике наибольшее распространение получила продольная (вдоль направления поля) деформация в магнитном поле, носящая название продольного эффекта Джоуля [1, 3].

Как и другие акустоэлектрические преобразователи, магнитострикционный преобразователь является обратимым. Обратный продольный эффект, носящий название эффекта Виллари, приводит к изменению намагниченности ферромагнетика при сжатии или растяжении магнитострикционного материала [3]. Именно этот эффект может являться причиной опасного акустоэлектрического преобразования, следовательно, утечки речевой информации.

Чувствительность η ферромагнетика определяется отношением относительного изменения магнитной проницаемости $\Delta\mu/\mu$ магнитостриктора к его относительной деформации $\xi = \Delta l/l$ и зависит от свойств материала: E – модуля упругости Юнга; ρ – плотности ферромагнетика, c – скорости распространения звука в нем, т.е.

$$M = \frac{\Delta\mu/\mu}{\xi} = \frac{(\Delta\mu/\mu) \cdot E}{\sigma} = \frac{(\Delta\mu/\mu) \cdot \rho \cdot c^2}{\sigma}, \quad (1)$$

где σ – механическое напряжение, возникающее в магнитострикторе при воздействии акустического давления.

Известно, что зависимость магнитной проницаемости $\Delta\mu$ от механических напряжений σ имеет нелинейный характер [1, 3, 6], это обусловлено нелинейностью кривой намагничивания ферромагнетиков и нелинейной зависимостью деформаций от усилия. Кроме того, из анализа динамической магнитострикционной зависимости (рис. 1) с учетом того, что магнитострикционный эффект является четным, т.е. независимым от направления возбуждающего поля, установлено следующее:

– прямой магнитострикционный эффект при возбуждении преобразователя переменным полем H без подмагничивания приводит к его механической деформации ξ с удвоенной частотой колебания, поскольку в результате преобразования происходит двухполупериодное выпрямление возбуждающего колебания магнитного поля;

– обратный магнитострикционный эффект при переменной механической деформации ξ преобразователя без подмагничивания приводит к изменению его намагниченности с частотой колебания в два раза меньше, поскольку в результате преобразования происходит одно полупериодное выпрямление возбуждающего механического колебания.

Таким образом, магнитостриктор, не подмагниченный постоянным полем, при его возбуждении переменным входным воздействием осуществляет нелинейное преобразование. Следовательно, акустический речевой сигнал, производящий механическую деформацию магнитостриктора, в процессе такого преобразования будет искажен. Это означает, что при несанкционированном съеме и прослушивании без дополнительных средств обработки такой сигнал будет неразборчив.

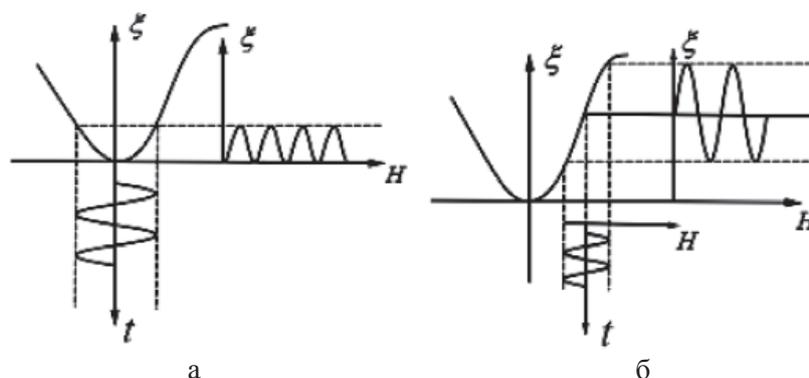


Рис. 1. Динамическая магнитострикционная кривая при возбуждении переменным полем: а – без подмагничивания; б – с подмагничиванием

Для эффективного съема речевой информации за счет акустоэлектрического преобразования на магнитостриктор должно подаваться постоянное смещающее магнитное поле H_0 , создаваемое пропусканием постоянного электрического тока через вспомогательную катушку или наложением постоянной составляющей тока на переменную составляющую в одной катушке возбуждения. При этом должно обеспечиваться условие $H \ll H_0$. В этом случае магнитостриктор будет находиться в постоянном деформированном состоянии. А внешнее деформирующее воздействие, создаваемое акустическим давлением, приведет к изменению этой деформации в некоторых пределах от максимального до минимального значения. Поэтому намагниченность магнитостриктора будет колебаться около некоторого среднего значения с частотой, равной частоте возбуждения, т.е. акустического сигнала.

Таким образом, магнитострикционный АЭП представляет собой ферромагнитный сердечник с нанесенной на него обмоткой, следовательно, этот эффект свойственен электрическим трансформаторам, дросселям, электромагнитным реле. Здесь перечислены только элементы, которые находятся в составе ОТСС и ВТСС практически любого выделенного помещения. При этом наиболее опасными являются магнитострикторы, находящиеся в подмагниченном состоянии. В качестве таких самых распространенных АЭП выступают дроссели

Математическая модель для оценки опасности возникновения акустоэлектрического канала утечки информации за счет магнитострикционного эффекта

В основу данной модели положено уравнение магнитострикции для дроссельного магнитоупругого датчика с однородной деформацией, поскольку длина сердечника l (рис. 2, а) мала по сравнению с длиной волны деформирующего воздействия [6].

Как показал проведенный анализ, внешнее воздействие в виде акустического давления приводит к возникновению в магнитострикторе механических напряжений, что является причиной изменения его магнитной проницаемости μ , индуктивности обмотки L и, следовательно, индуктивного сопротивления X_L . Поскольку обмотка запитывается от источника ЭДС, то в результате приложенного на сердечник механического воздействия в цепи будет наблюдаться изменение тока i и, как следствие – изменение напряжения u на нагрузке.

Моделируемый магнитострикционный преобразователь дроссельного типа приведен на рис. 2, а. Используя принцип электромеханических аналогий, эквивалентная схема магнитострикционного АЭП будет иметь вид четырехполюсника, представленного на рис. 2, б, где слева изображена электрическая схема замещения механической части, а справа – электрической части. Обе части соединены трансформатором, моделирующим электромеханическую связь с коэффициентом K .

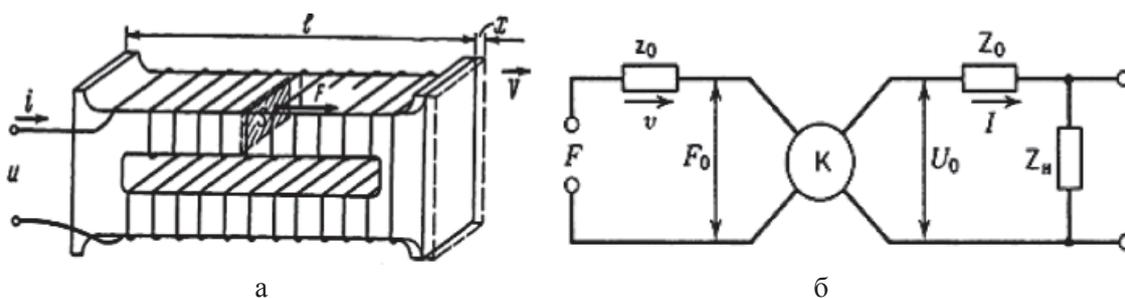


Рис. 2. Магнитострикционный преобразователь (а) и его эквивалентная схема (б)

блоков питания. Их опасность дополнительно обусловлена наличием гальванической связи или паразитной индуктивной связи с линией электропитания или соединительной линией, выходящей за пределы выделенного помещения.

Оценка опасности возникновения акустоэлектрического ТКУИ за счет магнитострикционного АЭП производится с помощью разработанной математической модели.

Уравнения прямого и обратного магнитострикционного акустоэлектрического преобразования для схемы, приведенной на рис. 2, б, имеют вид

$$\begin{cases} F = z_o \cdot v - K \cdot i, \\ U_o = K \cdot v + Z_o i, \end{cases} \quad (2)$$

где F – внешняя сила, действующая на поперечное сечение S сердечника; v – скорость деформации сердечника; U_o – переменное

напряжение на зажимах обмотки; i – ток в цепи обмотки; z_o – собственное комплексное механическое сопротивление подвижной части АЭП; Z_o – собственное комплексное электрическое сопротивление АЭП; K – коэффициент электромеханической связи АЭП.

Известно, что осевая чувствительность η АЭП определяется отношением напряжения на его выходе $U_{\text{вых}}$ (в нагрузке Z_n) к внешнему акустическому давлению P , т.е.

$$\eta = \frac{U_{\text{вых}}}{P} = \frac{F \nu U U_{\text{вых}}}{P F \nu U_o} = S \frac{1}{z_o} K \frac{Z_n}{Z_o + Z_n}. \quad (3)$$

Для рассматриваемого дроссельного магнитострикционного АЭП первичные параметры определяются следующими выражениями:

$$z_o = \frac{1 + j\psi}{j\omega \cdot C} = \frac{(1 + j\psi) \cdot S \cdot E \cdot (1 - \lambda^2 \mu / E)}{j\omega \cdot l}; \quad (4)$$

$$K = \frac{\lambda \cdot N}{R_\mu} = \frac{\lambda \cdot \mu \cdot S \cdot N}{l}; \quad (5)$$

$$Z_o = r + j\omega L; \quad L = \frac{\mu \cdot N^2 S}{l}, \quad (6)$$

где ψ – коэффициент механических потерь при деформации сердечника; C – продольная гибкость сердечника длиной l и сечением S ; ω – циклическая частота колебаний; E – модуль упругости сердечника; λ – магнитострикционная постоянная материала сердечника; μ – динамическая магнитная проницаемость сердечника вблизи его состояния начальной намагниченности; N – число витков обмотки дросселя; R_μ – полное магнитное сопротивление магнитопровода; r – активное сопротивление обмотки, учитывающее омические потери и потери на вихревые токи; L – индуктивность обмотки дросселя.

В связи с тем, что в справочниках по магнитострикционным материалам [4] приводится значение коэффициента механомагнитной связи, равного $a = \lambda \sqrt{\mu / E}$, целесообразно преобразовать коэффициент электромеханической связи магнитострикционного АЭП к виду

$$K = \frac{\lambda \cdot N}{R_\mu} = \frac{a \sqrt{\mu \cdot E} \cdot N \cdot S}{l}. \quad (7)$$

В результате магнитострикционного АЭП в линиях электропитания, заземления ОТСС и ВТСС или их соединительных ли-

ниях может появиться опасный информационный сигнал, величина которого равна

$$U_{\text{ос}} = P \eta \frac{Z_n}{Z_n + Z_{\text{втс}}}, \quad (8)$$

где $Z_{\text{втс}}$ – внутреннее комплексное сопротивление технического средства (ОТСС или ВТСС).

Поскольку на практике внутреннее сопротивление $Z_{\text{втс}}$ намного больше сопротивления Z_n цепи, выходящей за пределы выделенного помещения, тогда с учетом (4), (6) и (7) выражение (8) следует преобразовать к виду

$$U_{\text{ос}} = P \cdot \frac{j\omega \cdot N \cdot S \cdot a \sqrt{\mu \cdot E}}{(1 + j\psi) \cdot (1 - a^2) \cdot E (r + j\omega \cdot L + Z_{\text{втс}})} \cdot \frac{Z_n}{Z_n}. \quad (9)$$

Тогда, оценка возможности утечки конфиденциальной речевой информации за счет магнитострикционного АЭП сводится к сравнению рассчитанного напряжения $U_{\text{ос}}$ опасного информационного сигнала с предельно допустимым напряжением $U_{\text{доп}}$ на входе приемника разведки.

Таким образом, выражение (9) представляет собой математическую модель, позволяющую оценить опасность возникновения акустоэлектрического канала утечки информации за счет магнитострикционного эффекта. Достоинство модели состоит в том, что магнитострикционный АЭП описывается первичными параметрами сердечника и обмотки дросселя, которые приводятся в справочниках или легко рассчитываются по известным формулам.

С помощью разработанной модели определена чувствительность η магнитострикционных АЭП дроссельного типа. В качестве объекта исследования выступали гипотетические дроссели с характеристиками подобными для дросселей компьютерных блоков питания. Величина индуктивности L дросселей варьировалась в диапазоне 100–10000 мкГн. Предполагалась, что сердечник дросселя выполнен из пермендюра, имеющего очень большой коэффициент механомагнитной связи ($a = 0,5$). В результате установлено, что потенциальная (предельно возможная) чувствительность такого магнитострикционного АЭП на частоте 1000 Гц не превышает 10 мкВ/Па. Для сравнения чувствительность электромагнитных и электродинамических АЭП соответственно на три или четыре порядка выше.

Учитывая, что акустический речевой сигнал будет оказывать на сердечник дросселя давление, не превышающее 0,1 Па, а сопротивление $Z_{\text{втс}}$ может достигать десятка кОм, тогда напряжение $U_{\text{ос}}$ опасного

информационного сигнала в линии электропитания или соединительной линии не превысит сотен или даже десятков нановольт. Выявить такие маломощные сигналы на фоне шумов способны только высокочувствительные селективные нановольтметры. Таким образом, в работе установлено, что магнитострикционный АЭП потенциально может выступать в качестве источника опасного сигнала, однако утечка информации по такому каналу маловероятна.

Заключение

Итак, в работе получены следующие научные результаты:

- сформулированы условия, при которых возможно линейное преобразование механических деформаций, создаваемых акустическим сигналом, в колебания напряжения на выходе магнитоупругого датчика;
- разработана математическая модель для оценки опасности возникновения акустоэлектрического канала утечки информации за счет магнитострикционного эффекта;
- проведена оценка угрозы утечки речевой информации по акустоэлектрическому каналу за счет магнитострикционного эффекта.

Результаты работы рекомендуется использовать для оценки наличия опасного акустоэлектрического преобразования в технических системах, что позволит усилить эффективность контроля за их защитой.

Список литературы

1. Акустическая диагностика и контроль на предприятиях топливно-энергетического комплекса / В.М. Баранов, А.И. Гриценко, А.М. Карасевич и др. – М.: Наука, 1998. – 304 с.
2. Дураковский А.П., Куницын И.В. Оценка защищенности речевой информации. Часть 3. Проведение инструментального контроля в канале высокочастотного акустоэлектрического преобразования. – М.: НИЯУ МИФИ, 2015. – 44 с.
3. Левшина Е.С., Новицкий П.В. Электрические измерения физических величин: измерительные преобразователи. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 320 с.
4. Магнитострикционные материалы // сайт Физическая энциклопедия. – URL: http://dic.academic.ru/dic.nsf/enc_physics/1599 (дата обращения: 29.05.2016).
5. Поляков В.Е. Первичные преобразователи: учебное пособие, часть II. – СПб.: Изд-во СЗТУ, 2008. – 237 с.
6. Римский-Корсаков А.В. Электроакустика – М.: Связь, 1973. – 272 с.
7. Терентьев Е.Б., Халяпин Д.Б. Способ определения наличия акустоэлектрических преобразований во вспомогательных технических средствах и системах // Системы без-

опасности: материалы восемнадцатой научно-технической конференции. – СБ-2009. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2009. – С. 23–28.

8. Торокин А.А. Инженерно-техническая защита информации: учебное пособие. – М.: Гелиос АРВ, 2005. – 960 с.

9. Халяпин Д.Б. Защита информации. Вас подслушивают? Защищайтесь! – М.: НОУ ШО «Баярд», 2004 – 432 с.

10. Халяпин Д.Б., Терентьев Е.Б. Опасность возникновения акустоэлектрического канала утечки информации в охранно-пожарных извещателях // Системы безопасности: материалы IX научно-технической конференции. – СБ-2000. – М.: Академия ГПС МВД России, 2000. – С. 177–179.

References

1. Akusticheskaja diagnostika i kontrol na predpriyatiyah toplivo-jenergeticheskogo kompleksa (Acoustic diagnostics and control at the enterprises of fuel-energy complex) / V.M. Baranov, A.I. Gricenko, A.M. Karasevich i dr. M.: Nauka, 1998. 304 p.
2. Durakovskij A.P., Kunicyn I.V. Ocenka zashhishhenosti rechevoj informacii. Chast 3. Provedenie instrumentalnogo kontrolja v kanale vysokochastotnogo akustojelektricheskogo pre-obrazovaniya (Evaluation of the security of voice data. Part 3. Carrying out of instrumental control channel frequency acoustoelectric conversion). M.: NIJaU MIFI, 2015. 44 p.
3. Levshina E.S., Novickij P.V. Jelektricheskie izmerenija fizicheskikh velichin: izmeritelnye preobrazovateli (Electrical measurements of physical quantities: transducers). L.: Jenergoatomizdat, 1983. 320 p.
4. Magnitostrikcionnye materialy // sajt Fizicheskaja jenciklopedija (Magnetostrictive materials // Physical encyclopedia). URL: http://dic.academic.ru/dic.nsf/enc_physics/1599 (available at: 29.05.2016).
5. Poljakov V.E. Pervichnye preobrazovateli: uchebnoe posobie, chast II (Primary converters). Spb.: Izd-vo SZTU, 2008. 237 p.
6. Rimskij-Korsakov A.V. Jelektrjoakustika (Electroacoustics). M.: Svjaz, 1973. 272 p.
7. Torokin A.A. Inzhenerno-tehnicheskaja zashhita informacii: uchebnoe posobie (Engineering-technical protection of information). M.: Gelios ARV, 2005. 960 p.
8. Terentev E.B., Haljapin D.B. Sposob opredelenija nalichija akustojelektricheskikh preobrazovanij vo vspomogatelnyh tehniceskikh sredstvah i sistemah // Materialy vosemnadcatoj nauchno-tehnicheskoi konferencii «Sistemy bezopasnosti» SB-2009 (Method of determining the presence of acoustoelectric transformations in auxiliary equipment and systems // Proceedings of the eighteenth scientific and technical conference «safety systems»). M.: Akademija GPS MChS Rossii, 2009. pp. 23–28.
9. Haljapin D.B. Zashhita informacii. Vas podslushivajut? Zashhishhajtes! (The protection of information. You overhear? Protect yourself!) M.: NOU ShO «Bajard», 2004. 432 p.
10. Haljapin D.B., Terentev E.B. Opasnost voznikovenija akustojelektricheskogo kanala utechki informacii v ohrannopozharnykh izveshhateljah // Materialy IX nauchno-tehnicheskoi konferencii «Sistemy bezopasnosti» SB-2000 (The risk of customerorientated channel of information leakage in security-fire detectors // proceedings of the IX scientific and technical conference «safety Systems»). M.: Akademija GPS MVD Rossii, 2000. pp. 177–179.