

ДАТЧИК ТОКА С МАГНИТОЧУВСТВИТЕЛЬНОЙ ПЛЕНКОЙ

© 2021 г. В. О. Кислицын¹, В. А. Калинин¹, Г. Я. Карапетьян¹, В. Ф. Катаев², Н. В. Ермолаева^{2,*}

¹ООО НТЦ "РУСЬ", Санкт-Петербург, 199178, Россия

²Волгодонский инженерно-технический институт НИЯУ МИФИ, Волгодонск, 347360, Россия

*e-mail: ermolv@mail.ru

Поступила в редакцию 08.02.2021 г.

После доработки 18.02.2021 г.

Принята к публикации 24.02.2021 г.

Представлены результаты исследований чувствительных элементов датчиков тока на поверхностных акустических волнах на основе магниточувствительных пленок FeNi. Показано, что использование таких пленок обеспечивает достаточно большую чувствительность от магнитного поля и позволяет избавиться от магнитопроводов, что значительно уменьшает массогабаритные параметры датчика, облегчает его установку на токопроводящую шину. Приведена конструкция датчика тока с пленкой FeNi в акустическом канале и схема расположения датчика на токопроводящей шине. Представлены результаты исследований влияния расположения антенн на показания датчика. Показано, что при изменении расстояния между антеннами резонансные частоты ПАВ-резонатора не сдвигаются. Выявлено, что отношение площадей пиков первичного и вторичного отражений на импульсных откликах ПАВ-датчиков не зависит от расстояния между антеннами датчика и считывателя. Это позволит отказаться от опорного канала, что упростит конструкцию ПАВ-датчика и позволит использовать им более узкую полосу частот. Исследованы особенности работы считывателя для датчика. В целом, применение датчиков новой конструкции снизит стоимость устройства в целом. Предлагаемые в настоящей работе датчики рекомендуется применять для измерения тока в трехфазных линиях электропередачи и распределительных шкафах.

Ключевые слова: встречно-штыревой преобразователь, поверхностные акустические волны, линия задержки, магниточувствительные пленки, параметр S11

DOI: 10.1134/S2304487X21010090

ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] описаны датчики магнитного поля на ПАВ на основе изменения индуктивности, находящейся в зазоре магнитопровода, расположенного вокруг токопроводящей шины, а также на основе изменения емкости варикапов под действием напряжения индуцируемого в обмотке, намотанной на этот магнитопровод. Такие датчики должны иметь обязательно магнитопровод для своей работы, что значительно увеличивает массу и габариты датчика, а также усложняет его установку. Вместе с тем возможны такие датчики, в которых под действием магнитного поля вокруг токопроводящей шины происходит изменение скорости ПАВ, достаточное для обнаружения тока в шине величиной в единицы ампер. Это стало возможным вследствие того, что магниточувствительные пленки, нанесенные на поверхность подложки, вдоль которой распространяются ПАВ, под действием упругих деформаций, возникающих в них из-за магнитного поля, изменяют скорость ПАВ [2].

В настоящей работе представлена конструкция датчика тока на поверхностных акустических волнах на основе магниточувствительных пленок FeNi и приведены результаты исследований влияния различных факторов на показания датчика.

КОНСТРУКЦИЯ ДАТЧИКА НА ПАВ

Датчик представляет собой линию задержки на поверхностных акустических волнах (ПАВ), содержащую приемо-передающий встречно-штыревой преобразователь (ВШП), возбуждающий и принимающий ПАВ и расположенные по обе стороны от него отражательные ВШП (рис. 1). Между приемо-передающим ВШП и отражательным ВШП расположена магниточувствительная пленка FeNi, которая из-за магнитострикции под действием магнитного поля создает на поверхности подложки дополнительные механические напряжения, что приводит к изменению скорости ПАВ под ней. Это, в свою очередь, приводит к изменению частот пиков на частотной зависимости параметра S11 (рис. 2), так как фаза ПАВ отра-

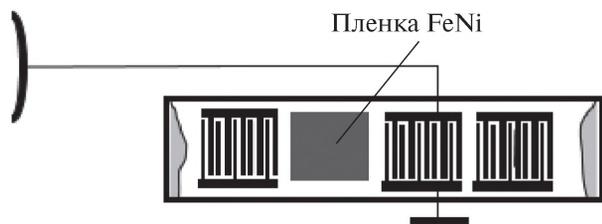


Рис. 1. Конструкция датчика тока с пленкой FeNi в акустическом канале.

женная от отражательного ВШП находящегося дальше, меняется относительно фазы ПАВ, отраженной от отражательного ВШП, находящегося ближе к приемно-передающему ВШП.

Как показано в работе [2], для датчика магнитного поля на основе пленок FeNi изменение скорости ПАВ составляет $\Delta v/v = 0.007\%$ при изменении напряженности магнитного поля на 10 Э (ток 1 А). Расчеты параметра S11 датчика (рис. 2) показывают, что при длине пленки в 1000 длин ПАВ на центральной частоте, такого изменения скорости ПАВ оказывается достаточно, чтобы заметно уменьшить конструкцию датчика.

На рис. 3 показан расчет изменения амплитуды параметра S11 на частоте 433.29 МГц при изменении напряженности магнитного поля от 0 до 40 Э, что соответствует изменению индукции магнитного поля от 0 до 0.004 Тл.

Напряженность магнитного поля около поверхности шины длиной b с током I определяется по формуле [2]:

$$H = I/b \quad (1)$$

В плоском проводнике длиной $b = 8$ см и толщиной $a = 5$ мм при токе 10 А напряженность

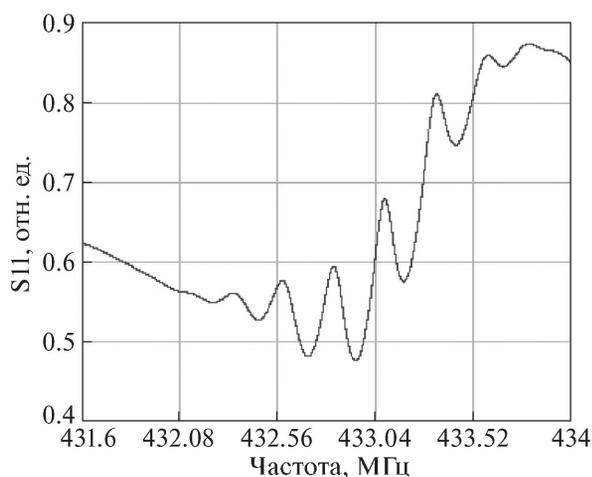


Рис. 2. Частотная зависимость параметра S11 датчика на ПАВ. Приемно-передающий ВШП имеет 340 пар электродов, а отражательный ВШП — 260 пар электродов.

магнитного поля равна $H = 10/0.08 = 125$ А/м = 1.56 Э, а при токе 100 А $H = 15.6$ Э.

Из рис. 3 видно, что амплитуда параметра S11 на фиксированной частоте будет заметно изменяться даже при полях в 1–2 Э, что соответствует напряженности магнитного поля на шине 10–20 А/м. Это означает, что такой датчик магнитного поля можно устанавливать на шину без магнитопровода (рис. 4), что значительно упростит и удешевит конструкцию датчика.

На рис. 4 приведена схема расположения датчика на токопроводящей шине, на рис. 5 представлено взаимное расположение считывателя и датчика. Датчик имеет антенну в виде полуволнового вибратора. Считыватель также имеет антенну в виде полуволнового вибратора.

Расстояние между антеннами равно $M\lambda$, где λ — длина электромагнитной волны на центральной частоте. Определим импеданс антенн и зависимость амплитуды волны от расстояния до антенны. Активная и реактивная составляющие входного импеданса антенны определяются как [3]:

$$R = 30 \times \{2[C + \ln 2kl + Ci2kl] + \cos 2kl[C + \ln kl - Ci4kl - 2Ci2kl] + \sin 2kl[Si4kl - 2Si2kl]\}, \quad (2)$$

$$X = 30 \times \{\sin 2kl[C - \ln(l/ka^2) + Ci4kl - 2Ci2kl] + \cos 2kl \times [Si4kl - 2Si2kl] - 2Si2kl\}, \quad (3)$$

где $Ci(x)$ и $Si(x)$ интегральные косинус и синус соответственно, l — длина вибратора, $k = 2\pi/\lambda$, a — радиус провода антенны, $C = 0.5272$ — постоянная Эйлера.

Амплитуда электромагнитной волны на расстоянии r от центра антенны равна [3]:

$$E_\theta = 60I_0 F(\theta) \frac{\exp(-ikr)}{r}, \quad (4)$$

$$F(\theta) = \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos \theta\right)}{\sin \theta},$$

где $\theta = \pi/2$ для расположения антенн показанных на рис. 5, r — расстояние между центрами антенн.

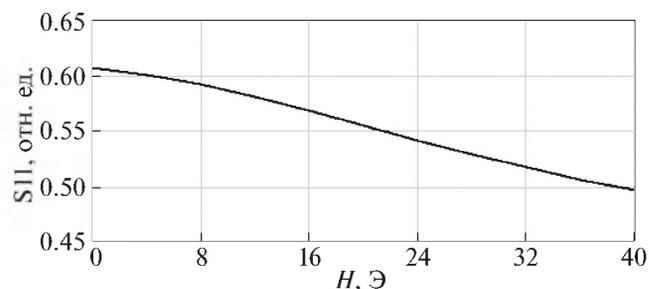


Рис. 3. Расчетная зависимость параметра S11 на частоте 433.49 МГц от магнитного поля. Длина магниточувствительной пленки равна 1000 длин ПАВ на центральной частоте.

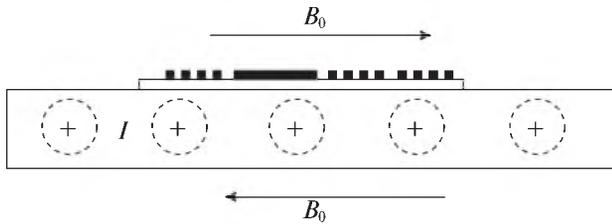


Рис. 4. Расположение датчика тока с пленкой FeNi на токопроводящей шине.

Учитывая, что для полуволнового вибратора $l = \lambda/4$, а так же то, что в датчике ВШП узкополосные ($2kl$ в рабочей полосе датчика изменяется незначительно), окончательно получаем: $R = 70.57 \text{ Ом}$, $X = 42.54 \text{ Ом}$.

Далее определим зависимость показаний ПАВ датчиков от расстояния между антеннами. Выясним сначала, будет ли меняться частота датчика температуры в виде ПАВ-резонатора при изменении расстояния между антеннами.

ПАВ-резонатор представляет собой трехчастотный ПАВ-резонатор на основе ВШП с центральной частотой 2451 МГц [4, 5]. Датчик опрашивается ЛЧМ-импульсом с центральной частотой 2451 МГц и полосой 20 МГц. Для более точного измерения частоты отраженный от датчика сигнал подается на смеситель, на который подается сигнал с частотой 2451 МГц от гетеродина и измеряется разностная частота. Из рис. 6 видно, что резонансные частоты при изменении расстояния в 1.5 раза не изменились. Также расчеты показали, что если антенна будет иметь до-

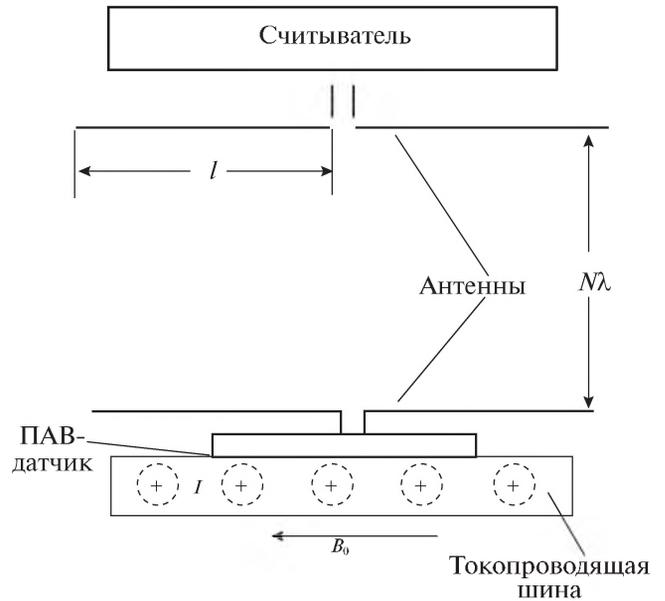


Рис. 5. Взаимное расположение считывателя и датчика.

полнительную емкость, например равную 0.3 пФ, мы получим сдвиг частот резонансов (рис. 7).

Проведем сравнение сдвигов резонансных частот и сдвигов разности резонансных частот. Измерив резонансные частоты получаем, что сдвиг первой резонансной частоты равен 0.0665 МГц ($3.1681 - 3.1016 = 0.0665 \text{ МГц}$), второй резонансной частоты – 0.076 МГц ($6.1875 - 6.1118 = 0.076 \text{ МГц}$). Изменение разности резонансных частот между первым и вторым резонансом $3.0194 - 3.0102 = 0.0092 \text{ МГц}$, между вторым и

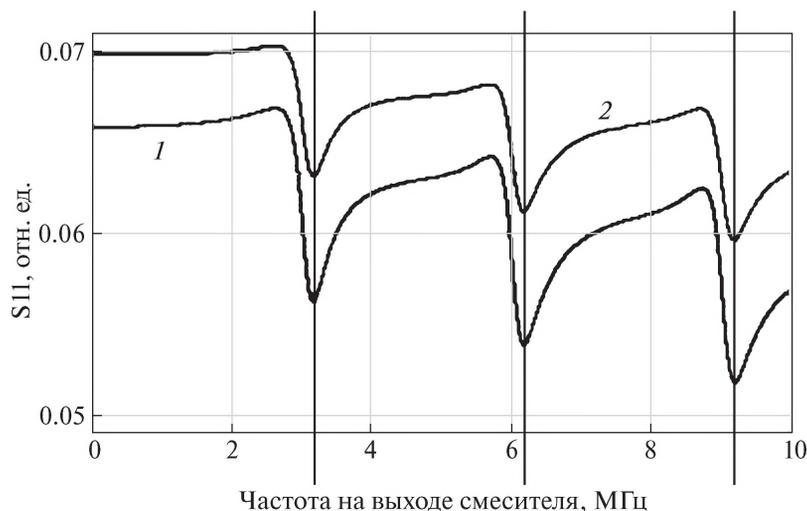


Рис. 6. Частотная зависимость отраженного от датчика сигнала на выходе смесителя при разных расстояниях от антенны: кривая 1 – расстояние между антеннами 10 длин волн, кривая 2 – 15 длин волн. Длина волны составляет 12 см, частота гетеродина 2451 МГц.

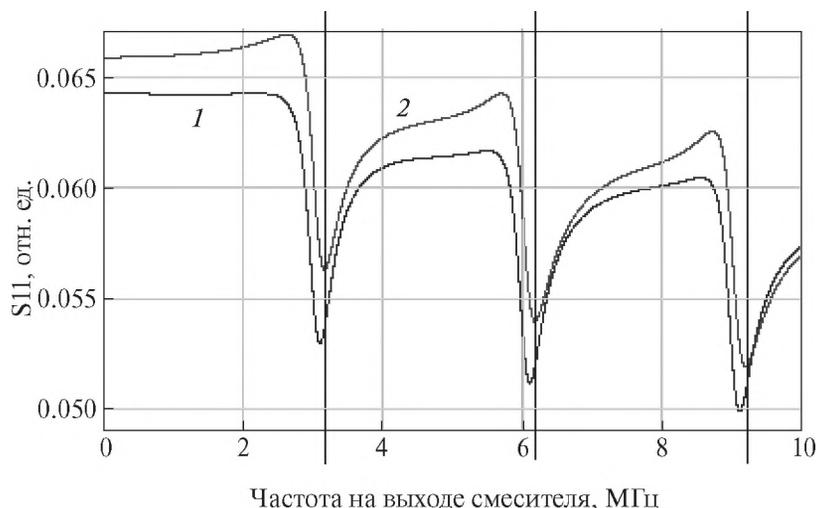


Рис. 7. Частотная зависимость отраженного от датчика сигнала на выходе смесителя при расстояниях от антенны 10 длин волн: кривая 1 — между антеннами включена дополнительная емкость 0.3 пФ, кривая 2 — дополнительной емкости нет.

третьим резонансами: $3.0176 - 3.00965 = 0.00795$ МГц. При этом разности частот в отсутствии дополнительной емкости соответственно равны 3.0194 МГц ($3.1681 - 6.1875 = 3.0194$ МГц) и 3.0176 МГц ($9.2051 - 6.1875 = 3.0176$ МГц). Когда есть дополнительные емкости, эти величины составляют: $3.1016 - 6.1118 = -3.0102$ МГц и $6.1118 - 9.12145 = -3.00965$ МГц.

Из сравнения сдвигов резонансных частот и сдвигов разности резонансных частот видно, что резонансные частоты уходят в минимум в 8.3 раза больше, чем разностные частоты ($0.076/0.0092 = 8.3$). Поэтому использование резонатора с двумя или тремя резонансами позволит существенно уменьшить влияние дополнительных емкостей на точность сдвига частот резонанса, так как температуру можно будет измерять не по изменению резонансной частоты от температуры, а по изменению разности частот резонансов от температуры, которая зависит от внешних условий значительно меньше, чем резонансные частоты. Следует отметить, что если дополнительная емкость

равна 0.9 пФ, уход частоты резонанса на 0.177 МГц превысит уход резонансной частоты при изменении температуры на 1 градус (0.129 МГц).

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ СЧИТЫВАТЕЛЯ ДЛЯ ДАТЧИКА

На рис. 8 показана схема считывателя для датчика, позволяющего измерять переменное магнитное поле. Схема работает следующим образом. С генератора ВЧ с частотой 433.29 МГц, которая соответствует максимуму параметра S11 при нулевом магнитном поле, поступает сигнал на обмотку дифференциального трансформатора, который затем поступает на вторичные обмотки, а с них на антенну и резистор R. Антенна излучает электромагнитный сигнал в направлении антенны датчика. Под действием переменного магнитного поля будет изменяться во времени параметр S11 датчика, что приведет к изменению во времени импеданса антенны считывателя. Это приведет к тому, что сигналы, подаваемые на детекторную головку, не будут компенсировать друг друга.

В результате, на выходе детекторной головки появится сигнал, величина которого будет тем больше, чем больше будет изменяться параметр S11 антенны датчика. Так как зависимость амплитуды параметра S11 датчика почти линейно зависит от величины магнитного поля, то на выходе детекторной головки будет наблюдаться сигнал, пропорциональный изменению тока в шине. Но так как изменение скорости ПАВ не зависит от знака магнитного поля, то на выходе детекторной головки будет наблюдаться сигнал с удвоенной частотой. Поэтому на ее выходе надо преду-

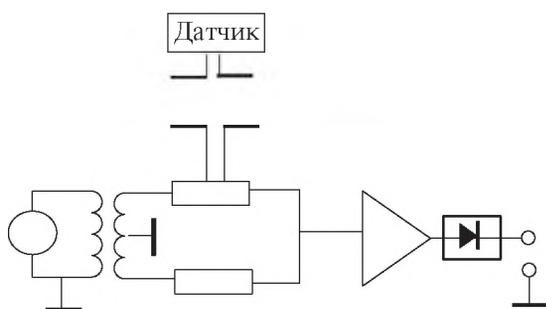


Рис. 8. Схема считывателя для датчика.

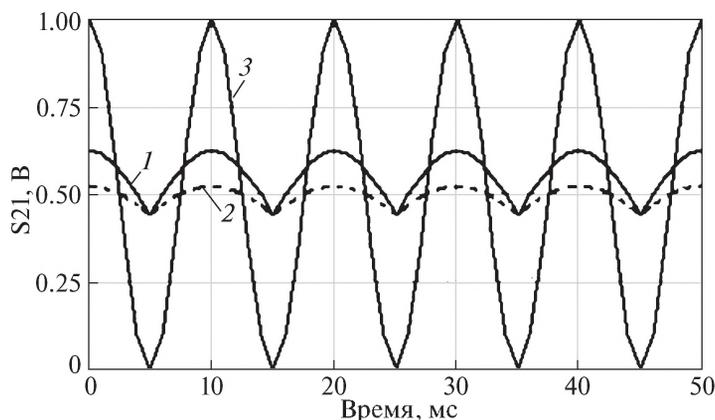


Рис. 9. Амплитуда сигнала на выходе считывателя до детекторной головки (при напряжении на генераторе 1 В) при разных расстояниях между антеннами: кривая 1 – 5 длин волн (80 см), кривая 2 – 10 длин волн (160 см), кривая 3 – калибровочный сигнал.

смотреть либо делитель частоты на два, либо устройство, которое после каждого минимума сигнала будет менять полярность сигнала. В этом случае после каждого полупериода будет меняться знак сигнала и восстановится исходный сигнал. Таким образом, анализируя зависимость величины тока в шине от времени, можно будет судить об искажениях тока в сети и измерять мощность и энергию тока.

Такой считыватель эффективно подходит для измерения тока в шинах в электрических шкафах, так как считывание будет производиться непрерывным сигналом и все переотражения от стенок шкафа влиять на него не будут. На выходе считывателя будет непрерывный во времени сигнал, пропорциональный току в шине. Кроме того, расстояние между антеннами в шкафу можно будет сделать не более 50 см, что значительно увеличит сигнал на выходе детекторной головки и сделает его существенно выше шумов. В итоге это будет способствовать повышению точности измерений.

Как следует из самого метода считывания, когда частота ВЧ-генератора соответствует максимуму параметра S_{11} , опорный канал не нужен, поскольку максимумы напряжения на выходе детекторной головки будут соответствовать нулевому значению тока в шине. Достаточно при установке датчика подобрать частоту ВЧ-генератора так, чтобы амплитуда напряжения на выходе детекторной головки была бы максимальной. Далее эта частота фиксируется. Уход максимума напряжения на выходе детекторной головки с этой частоты приведет к значительному снижению точности измерения, поскольку амплитуда напряжения на выходе детекторной головки сильно зависит от положения частоты максимума параметра S_{11} относительно частоты ВЧ-генератора. Поэтому необходимо, чтобы частота ВЧ-генера-

тора все время бы соответствовала частоте максимума параметра S_{11} .

Расчеты показывают, что при использовании подложки ниобата лития необходимо измерять температуру с точностью 0.1°C [6]. Но беспроводных датчиков температуры с такой точностью нет. Поэтому необходимо использовать для датчиков подложки ST-среза кварца, в котором частота уходит всего на 0.14 МГц при центральной частоте 433 МГц при изменении температуры на 100°C . Это означает, что изменение температуры на 5°C не приведет к изменению точности измерения, не превышающей доли процента. Поэтому беспроводный датчик с точностью измерения $\pm 2^\circ\text{C}$ вполне подойдет для слежения за частотой генератора и не приведет к снижению точности измерений.

На рис. 9 показан сигнал на выходе детекторной головки считывателя, работающего на одной частоте f_0 , при разных расстояниях между антеннами. Видно, что с увеличением расстояния напряжение на выходе детекторной головки убывает. Как видно, размах сигнала зависит от расстояния от антенны, что делает невозможным точное измерение амплитуды тока в шине (рис. 10). Чтобы этого избежать, необходимо ввести еще одну частоту f_1 , на которой амплитуда выходного сигнала не будет зависеть от тока в шине, так как там нет пульсаций, которые смещаются под действием тока в шине. Причем сигнал с этой частотой промодулирован с частотой 100 Гц, и имеет амплитуду, строго равную 1 В.

В этом случае можно прокалибровать зависимость сигнала на выходе считывателя на частоте f_0 , амплитуда которого будет зависеть от тока в шине, относительно амплитуды модуляции. Тогда считыватель будет иметь фильтры, которые будут посылать сигналы с разными частотами на

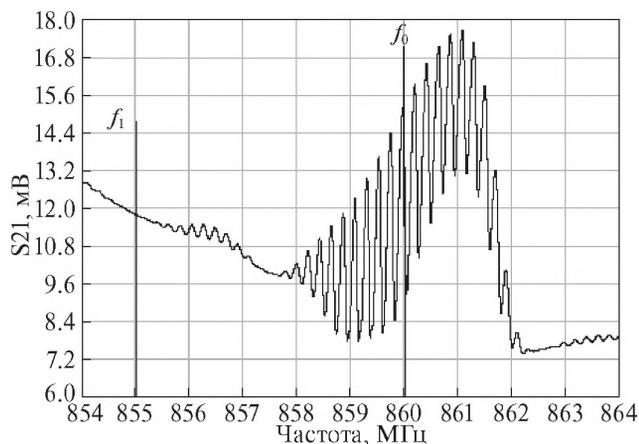


Рис. 10. Напряжение на выходе считывателя (до детекторной головки).

разные детекторные головки (рис. 11). После детекторных головок будут стоять одинаковые усилители с автоматической регулировкой усиления. Тогда усилитель опорного сигнала будет усиливать сигнал на выходе детекторной головки до напряжения 1 В. Усилитель после детекторной головки с несущей f_0 будет иметь тот же коэффициент усиления, что даст возможность определять амплитуду сигнала относительно опорного канала.

Расчеты показали, что сигнал на выходе детекторной головки при одночастотном методе считывания информации с датчика имеет размах не более 8–18 мВ при расстояниях между антеннами в 5–10 длин волн. Это слабый сигнал, чтобы его смогла протектировать детекторная головка. Поэтому сигнал до подачи на детекторную головку необходимо усиливать на 20–40 дБ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Применение датчиков новой конструкции обеспечивает достаточно большую чувствительность от магнитного поля и позволяет избавиться от магнитопроводов, что значительно уменьшает массогабаритные параметры датчика, облегчает его установку на токопроводящую шину, снижает стоимость устройства в целом.

2. Показано, что при изменении расстояния между антеннами резонансные частоты ПАВ резонатора не сдвигаются.

3. Выявлено наличие сдвига резонансных частот при наличии паразитных емкостей в районе даже до 1 пФ. При этом расстояние между частотами трехчастотного резонатора изменяется почти на порядок слабее, чем сдвиг резонансных частот. Это позволит повысить точность измерения температуры с помощью ПАВ резонатора, имеющего две-три резонансных частоты.

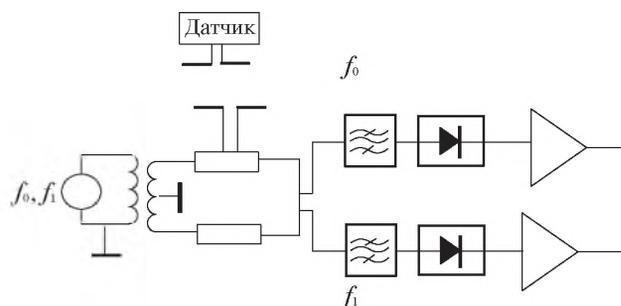


Рис. 11. Считыватель с опорным каналом.

4. Показано, что отношение площадей пиков первичного и вторичного отражений на импульсных откликах ПАВ-датчиков не зависит от расстояния между антеннами датчика и считывателя. Это позволит отказаться от опорного канала, что упростит конструкцию ПАВ-датчика и позволит использовать им более узкую полосу частот. Это особенно важно при измерении трехфазных цепей, где необходимо измерять ток в каждой фазе независимо друг от друга.

5. Предлагаемые в настоящей работе пассивные беспроводные датчики на ПАВ можно с успехом применять для измерения тока в трехфазных линиях электропередачи и распределительных шкафах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кислицын В.О., Калинин В.А., Карпетьян Г.Я., Катаев В.Ф., Ермолаева Н.В. Чувствительные элементы пассивных беспроводных датчиков на поверхностных акустических волнах для измерения тока в трехфазных цепях // Вестник НИЯУ «МИФИ». 2020. Т. 9. № 2. С. 177–183.
2. Jie Tong, Yang Wang, Shiyue Wang, Wen Wang, Yana Ji and Xinlu Liu. Development of a Magnetostrictive Fe-Ni Coated Surface Acoustic Wave Current Sensor // Appl. Sci. 2017. V. 7. P. 755; doi: 10.3390/app7080755.
3. Войтович Н.И., Ершов А.В., Соколов А.Н. УКВ вибраторные антенны / Челябинск, Издательство ЮУрГУ, 2002. 85 с.
4. Кислицын В.О., Калинин В.А., Карпетьян Г.Я., Катаев В.Ф., Сысоев И.А. Пассивные беспроводные датчики тока для трехфазных цепей // Вестник Северокавказского федерального университета. 2019. № 3 (72). С. 7–16.
5. Kadota M., Ito S., etc. SAW magnetic sensors composed of various Ni electrode structures on quartz. IEEE International Ultrasonics Symp. Proc. 2011. P. 805–809.
6. Большеева О.Л. Материалы для акустоэлектронных устройств: учеб. пособие. СПб.: ГУАП, 2005. 50 с.: ил.

Current Sensor with a Magnetically Sensitive Film

V. O. Kislitsyn^a, V. A. Kalinin^a, G. Ya. Karapetyan^a, V. F. Kataev^b, and N. V. Ermolaeva^{b,#}

^a Scientific–Technical Center Rus, St. Petersburg, 199178 Russia

^b Volgodonsk Engineering–Technical Institute, National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Volgodonsk, Rostov-on-Don oblast, 347360 Russia

[#]e-mail: ermolv@mail.ru

Received February 8, 2021; revised February 18, 2021; accepted February 24, 2021

Abstract—Sensitive elements of current sensors on surface acoustic waves based on magnetically sensitive Fe-Ni films have been studied. It is shown that the use of such films provides a sufficiently high sensitivity to a magnetic field and allows refusing magnetic cores, which significantly reduces the weight and size parameters of the sensor and facilitates its installation on a conductive bus. The design of the current sensor with a FeNi film in the acoustic channel and the layout of the sensor on the conductive bus are shown. The influence of the location of the antennas on the sensor readings have been studied. It is shown that when the distance between the antennas changes, the resonant frequencies of the resonator surfactant do not shift. It is revealed that the ratio of the peak areas of primary and secondary reflections on the pulse responses of surfactant sensors does not depend on the distance between the sensor and reader antennas. This will eliminate the reference channel, which will simplify the design of the surfactant sensor.

Keywords: counter-pin converter, surface acoustic waves, delay line, magnetosensitive films, parameter S11

DOI: 10.1134/S2304487X21010090

REFERENCES

1. Kislicin V.O., Kalinin V.A., Karapetyan G.Ya., Kataev V.F., Ermolayeva N.V. Chuvstvitelnye elementy passivnyh besprovodnyh datchikov na poverhnostnyh akusticheskikh volnah dlya izmereniya toka v trekhfaznykh tsyupyah [Sensitive elements of passive wireless sensors on surface acoustic waves for measuring current in three-phase circuits]. *Vestnik NIYaU MIFI*, 2020, vol. 9, no. 2, pp. 177–183 (in Russian).
2. Jie Tong, Yang Wang, Shiyue Wang, Wen Wang, Yana Jiaand Xinlu Liu, Development of a Magnetostrictive FeNi Coated Surface Acoustic Wave Current Sensor, *Appl. Sci.* 2017. 7. 755; doi: 10.3390 / app7080755.
3. Vojtovich N.I., Ershov A.V., Sokolov A.N. *UKV vibratormye anteny* [VHF vibrating antennas]. Chelyabinsk, South Ural State University Publ., 2002. 85 p.
4. Kislicin V.O., Kalinin V.A., Karapetyan G.Ya., Kataev V.F., Sysoev I.A. Passivnyye besprovodnyye datchiki toka dlya trekhfaznykh tsepey [Passive wireless current sensors for three-phase circuits]. *Bulletin of the North Caucasus Federal University*, 2019 no. 3 (72), pp. 7–16 (in Russian).
5. Kadota M., Ito S., Ito Yo., Hada T., Okaguchi K. SAW magnetic sensors composed of various Ni electrode structures on quartz. *IEEE International Ultrasonics Symp. Proc.*, 2011. pp. 805–809.
6. Balysheva O.L. *Materialy dlya akustoelektronnykh ustroystv: ucheb. Posobie* [Materials for acousto-electronic devices]. St. Petersburg, GUAP., 2005. 50 p.