

УДК 621.311.16:621.315.05:681.89

ДАТЧИК ТЕМПЕРАТУРЫ НА ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ НА ОСНОВЕ ЛИНИИ ЗАДЕРЖКИ И РЕЗОНАТОРА

© 2022 В.О. Кислицын^{1*}, Г.Я. Карапетьян², В.Ф. Катаев^{3**}, Б.М. Середин⁴, Н.В. Ермолаева^{3***}

¹ООО НТЦ «РУСЬ», Санкт-Петербург, 199178, Россия

²Южный федеральный университет, 344090, Россия

³Волгодонский инженерно-технический институт НИЯУ МИФИ, Волгодонск,
Ростовская обл., 347360, Россия

⁴Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)
им. М.И. Платова, г. Новочеркасск, Ростовская обл., 346428, Россия

*e-mail: kislitsyn@rfsaw.ru

**e-mail: kataev.v.f.@gmail.com

***e-mail: ermolnv@mail.ru

Поступила в редакцию: 17.01.2023

После доработки: 30.01.2021

Принята к публикации: 07.02.2023

Представлены результаты исследований датчика температуры на основе линии задержки и резонатора на поверхностных акустических волнах. Разработана методика расчета такого датчика при условии, что отражательный встречно-штыревой преобразователь линии задержки содержит расщепленные электроды и к нему подсоединен резонатор. Произведен расчет датчика на частоту 433 МГц. Показано, что влияние внешних емкостей на резонансную частоту при подсоединении к приемо-передающему встречно-штыревому преобразователю существенно меньше, чем при подсоединении их непосредственно к резонатору. В этом случае ПАВ-резонатор имеет с антенной только акустическую связь, и влияние антенны и окружающих предметов на резонансную частоту будет отсутствовать. Отмечено, что использование линий задержки на поверхностных акустических волнах ослабляет влияние внешних емкостей на резонансный пик параметра S_{11} по сравнению с влиянием их на резонансный пик ПАВ-резонатора, что повышает точность измерения температуры. Предлагаемый в настоящей работе датчик температуры рекомендуется применять для автоматизации процессов контроля за температурными режимами эксплуатирующегося высоковольтного электрооборудования трансформаторных и распределительных подстанций.

Ключевые слова: поверхностные акустические волны (ПАВ), встречно-штыревой преобразователь (ВШП), линия задержки на ПАВ, ПАВ-резонатор, параметр S_{11} .

DOI: <https://doi.org/10.26583/vestnik.2022.241>

ВВЕДЕНИЕ

Автоматизированный температурный контроль (мониторинг) эксплуатирующегося высоковольтного электрооборудования трансформаторных и распределительных подстанций является важной составной частью единой системы обеспечения энергоснабжения и безопасности эксплуатации. От степени автоматизации процессов контроля за температурными режимами эксплуатации судового электрооборудования зависит как скорость реакции системы обеспечения энергоснабжения на возникновение нештатной ситуации (нарушение контакта, старение изоляции, несимметричность нагрузки, фазные замыкания и прочие причины), так и вероятность их возникновения в целом, что в свою очередь определяет надежность системы

энергоснабжения и сохранность эксплуатационного ресурса электрооборудования.

В настоящее время одним из эффективных способов измерения температуры является пассивный беспроводный датчик на основе резонатора на поверхностных акустических волнах [1]. В таком датчике с помощью считывателя измеряется параметр S_{11} приемо-передающей антенны считывателя, на который влияет отраженный от антенны датчика сигнал. При этом температура определяется по пику резонатора на поверхностных акустических волнах (ПАВ), частота которого зависит от температуры. Температуру определяют, зная частоту резонансного пика при известной температуре и сдвиг частоты при температуре, которую необходимо измерить. Но в таком методе измерения температуры имеется недостаток. Дело в том, что ча-

ДАТЧИК ТЕМПЕРАТУРЫ НА ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ НА ОСНОВЕ ЛИНИИ ЗАДЕРЖКИ И РЕЗОНАТОРА

стотное положение резонансного пика на частотной зависимости параметра S_{11} зависит не только от температуры, но и от параметров антенны, подключенной к резонатору, и от взаимного расположения антенны и различных металлических предметов, находящихся около нее. Такое влияние сводится к подсоединению к ПАВ-резонатору дополнительных емкостей, что и приводит к сдвигу его резонансной частоты. Это влияние небольшое, но если учесть, что сдвиг частоты резонанса при изменении температуры может быть сравним с частотным сдвигом, обусловленным влиянием антенны и окружающих предметов, то это может привести к существенной ошибке при измерении температуры. Не случайно известные датчики температуры на основе ПАВ-резонатора имеют точность измерения $\pm 2^\circ$.

ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ

Чтобы устранить указанный недостаток и тем самым повысить точность измерения температуры, необходимо устранить электрическую связь между ПАВ-резонатором и антенной. Для этого можно использовать ПАВ-линию задержки (ЛЗ), содержащую приемо-передающий и отражательный встречно-

штыревые преобразователи (ВШП). В этом случае ПАВ-резонатор подсоединяется к отражательному ВШП, а приемо-передающий ВШП подсоединяется к антенне. Тогда ПАВ-резонатор имеет с антенной только акустическую связь, и влияние антенны и окружающих предметов на резонансную частоту будет отсутствовать.

В качестве ПАВ-резонатора будем использовать ПАВ-резонатор, описанный в работе [2]. Он представляет собой параллельно включенные попарно последовательно соединенные прореженные ВШП, при этом к резонатору подсоединена шунтирующая емкость, как показано на рис. 1. Если такой резонатор подсоединить к отражательному ВШП, то вне резонансной частоты он будет шунтирован емкостью резонатора, что приведет к резкому снижению коэффициента отражения ПАВ от него. В то же время на частоте вблизи резонанса собственная индуктивность скомпенсирует шунтирующую емкость, что приведет к резкому увеличению коэффициента отражения ПАВ от отражательного ВШП на частотах близких к резонансной. Это в свою очередь приведет к появлению пика на входном сопротивлении ЛЗ на ПАВ, а, следовательно, и появлению пика на частотной зависимости параметра S_{11} антенны.

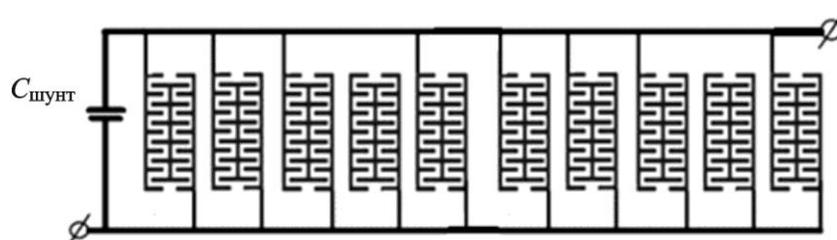


Рис. 1. Конструкция ПАВ резонатора

Конструкция датчика приведена на рис. 2. Для уменьшения потерь на двунаправленность в качестве приемо-передающего ВШП используется однонаправленный ВШП с внутренними отражателями [3], а в качестве отражательного

ВШП – ВШП с расщепленными электродами. Это сделано для того, чтобы коэффициент отражения ПАВ от ВШП в короткозамкнутом контуре был близок к нулю [4].

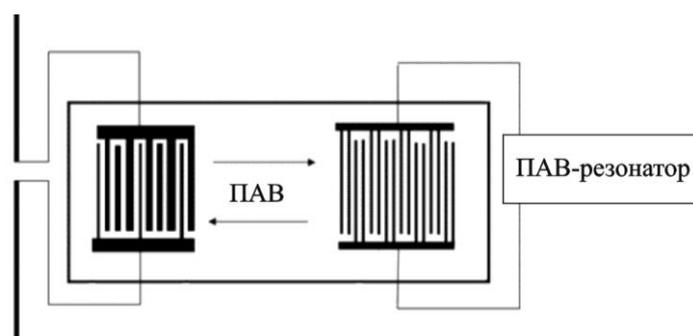


Рис. 2. Датчик температуры с ЛЗ и резонатором на ПАВ

РАСЧЕТ ПАВ-ДАТЧИКА НА ОСНОВЕ
ПАВ-РЕЗОНАТОРА И ЛЗ

Входная проводимость ЛЗ на ПАВ, представленной на рис. 2, определяется как [5]

$$Y_{\text{вх}} = \frac{\left\{ Y_{11} - \frac{Y_{12}^2}{Y_{22} + Y_{\text{н}}} \right\}}{1 + Z_G \left(Y_{11} - \frac{Y_{12}^2}{Y_{22} + Y_{\text{н}}} \right)}, \quad (1)$$

где Y_{11} – проводимость приемо-передающего ВШП; $Y_{\text{н}} = 1/R_{\text{н}}$ – проводимость нагрузки; $R_{\text{н}}$ – сопротивление нагрузки, подключаемое к отражательному ВШП; Z_G – сопротивление генератора.

$$Y_{11} = G_{a1} + j(B_{a1} + \omega C_{T1}),$$

$$Y_{12}^2 / (Y_{11} + Y_{22}) = G_{a1} \cdot K_{\text{отрВШП}} \cdot e^{-j\omega T},$$

$$T = 2l / V_{\text{SAW}},$$

где l – расстояние между ВШП; $K_{\text{отрВШП}}$ – коэффициент отражения от отражательного ВШП:

$$K_{\text{отрВШП}} = \frac{-G_{a2}}{G_{a2} + j\omega(C_{T2} + B_{a2} + Y_{\text{н}})}.$$

Причем значения B_a и G_a определяются по формулам [4]:

$$G_{a1} \approx 8 \cdot f_0 \cdot k^2 C_{T1} \cdot N1 \cdot \left(\frac{\sin X1}{X1} \right)^2,$$

$$B_{a1} \approx 8 \cdot f_0 \cdot k^2 C_{T1} \cdot N1 \cdot \left(\frac{\sin 2X1 - 2X1}{2X1^2} \right),$$

$$X1 = \pi \cdot N1 \cdot \frac{f - f_0}{f_0}, \quad C_{T1} = W \cdot N1 \cdot Cs,$$

$$G_{a2} \approx 8 \cdot f_0 \cdot k^2 C_{T2} \cdot N2 \cdot \left(\frac{\sin X2}{X2} \right)^2,$$

$$B_{a2} \approx 8 \cdot f_0 \cdot k^2 C_{T2} \cdot N2 \cdot \left(\frac{\sin 2X2 - 2X2}{2X2^2} \right),$$

$$X2 = \pi \cdot N2 \cdot \frac{f - f_0}{f_0}, \quad C_{T2} = W \cdot N2 \cdot Cs,$$

где $N1$ – число пар электродов (периодов) приемо-передающего ВШП; k – коэффициент электромеханической связи; Cs – емкость одновол-

новой секции ВШП на единицу апертуры ВШП; l – расстояние между ВШП; $N2$ – число пар электродов (периодов) отражательного ВШП.

Апертуры обоих ВШП одинаковы.

Эти выражения получены при допущении, что от электродов ВШП ПАВ не отражаются. В этом случае при замыкании ВШП ($R_L = 0$ или $Y_{\text{н}} = \infty$) коэффициент отражения ПАВ от ВШП равен 0. Поэтому с помощью внешней нагрузки коэффициент отражения от ВШП можно менять в очень широких пределах, меняя проводимость нагрузки. Такая возможность появляется, если в ВШП использовать расщепленные электроды. В этом случае период следования электродов будет вдвое меньше длины ПАВ, и максимум отражения придется на частоту вдвое выше центральной частоты ВШП. Поэтому отражением ПАВ от такого ВШП в короткозамкнутом состоянии можно будет пренебречь.

В качестве нагрузки, как видно из рис. 2, используется ПАВ-резонатор, показанный на рис. 1.

Активная составляющая проводимости резонатора

$$Y_1 = \frac{n_1 \cdot n_2 \cdot z_1}{(n_1 \cdot z_1)^2 + (n_1 \cdot z_2)^2}, \quad (2)$$

а реактивная составляющая проводимости резонатора равна:

$$Y_2 = \frac{-n_1 \cdot n_2 \cdot z_2}{(n_1 \cdot z_1)^2 + (n_1 \cdot z_2)^2} \times \\ \times 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_{\text{шунт}}, \quad (3)$$

где n_1 – число ВШП, соединенных последовательно, n_2 – число последовательно соединенных n_1 ВШП, соединенных параллельно. Как видно из рис. 1, $n_1 = 2$, а $n_2 = 10$; z_1 и z_2 – активная и реактивная составляющие сопротивления одинаковых ВШП, из которых состоит резонатор.

$$z_1 = \frac{G_{a\text{ВШП}} + \frac{1}{R_{\text{об}}}}{\left(G_{a\text{ВШП}} + \frac{1}{R_{\text{об}}} \right)^2 + (B_{a\text{ВШП}} + 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_{T\text{ВШП}})^2} + R_1, \quad (4)$$

$$z_2 = \frac{-(B_{a\text{ВШП}} + 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_{T\text{ВШП}})}{\left(G_{a\text{ВШП}} + \frac{1}{R_{\text{об}}} \right)^2 + (B_{a\text{ВШП}} + 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_{T\text{ВШП}})^2}, \quad (5)$$

$$G_{a\text{ВШП}} \approx 8 \cdot f_0 \cdot k^2 C_{T2} \cdot N2 \cdot \left(\frac{\sin X}{X} \right)^2, \quad B_{a\text{ВШП}} \approx 8 \cdot f_0 \cdot k^2 C_{T\text{ВШП}} \cdot N2 \cdot \left(\frac{\sin 2X - 2X}{2X^2} \right),$$

$$X = \pi \cdot N_{\text{ВШП}} \cdot \frac{f - f_{\text{орез}}}{f_{\text{орез}}}, \quad C_{T\text{ВШП}} = W_{\text{ВШП}} \cdot N2 \cdot Cs,$$

ДАТЧИК ТЕМПЕРАТУРЫ НА ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ
НА ОСНОВЕ ЛИНИИ ЗАДЕРЖКИ И РЕЗОНАТОРА

где $N_{\text{ВШП}}$ – число пар электродов в ВШП; $W_{\text{ВШП}}$ – апертура ВШП в резонаторе; $f_{0\text{рез}}$ – центральная частота ВШП в резонаторе; $R_{0б}$ – сопротивление, обусловленное частичным преобразованием ПАВ в объемные волны; R_1 – сопротивление в пленке, обусловленное омическими потерями в металлической пленке, из которой сделаны ВШП [1].

Как показали расчеты, лучшие результаты по добротности резонаторов получаются, если ВШП сделать прорезанными таким образом, что длина ВШП соответствовала бы полному числу пар электродов, а реальное число электродов было бы в 4 раза меньше. Тогда при $N_{\text{ВШП}} = 600$ число пар электродов в выражениях для G_a , B_a и $C_{\text{ТВШП}}$ следует положить равным 150.

Тогда модуль входного сопротивления ЛЗ на ПАВ с подсоединенным к отражательному ВШП ПАВ-резонатору равен:

$$|Y_{\text{вх}}| = \frac{\sqrt{(ReY_{11} - A)^2 + (ImY_{11} - B)^2}}{\sqrt{[1 + Rg(Y_{11} - A)]^2 + [Rg(ImY_{11} - B)]^2}}, \quad (6)$$

где

$$A = G_{a1} \cdot [ReK_{ref} \cos(X_3) + ImK_{ref} \sin(X_3)], \quad (7)$$

$$B = G_{a1} \cdot [-ReK_{ref} \sin(X_3) + ImK_{ref} \cos(X_3)], \quad (8)$$

$X_3 = 2 \cdot \pi \cdot N_3 \cdot \frac{f - f_0}{f_0}$; N_3 – удвоенное расстояние между центрами ВШП; ReK_{ref} – действительная часть коэффициента отражения ПАВ от отражательного ВШП; ImK_{ref} – мнимая часть коэффициента отражения ПАВ от отражательного ВШП; Rg – сопротивление генератора ($Rg = 50 \text{ Ом}$).

В этом случае параметр S_{11} , определяемый как

$$S_{11} = \begin{cases} \frac{Z_{\text{вх}}}{Rg}, & Z_{in} > Rg \\ \frac{Rg}{Z_{\text{вх}}}, & Z_{in} < Rg \end{cases}, \quad Z_{\text{вх}} = 1/|Y_{\text{вх}}|,$$

зависит не только от коэффициента отражения, но и от нагрузки, подсоединяемой к приемопередающему ВШП, т.е. от импеданса резонатора. Полагая далее $N_1 = N_2 = 17$, $W = 600 \text{ мкм}$, $N_{\text{ВШП}} = 600$, $W_{\text{ВШП}} = 27 \text{ мкм}$, $C_{\text{шунт}} = 19.8 \text{ пФ}$, $C_s = 450 \text{ пФ/м}$, $k^2 = 0.058$, что соответствует расположению и ЛЗ, и резонатора на $YX/128^\circ$ срезе ниобата лития, рассчитаем частотную зависимость модуля входного сопротивления ($Z_{\text{вх}}$) и параметра S_{11} , а также модуля импеданса резонатора ($Z_{\text{рез}}$) при расстоянии между ВШП в 200 длин ПАВ на центральной частоте и цен-

тральной частоте ВШП ЛЗ и ВШП-резонатора $f_0 = f_{0\text{рез}} = 433 \text{ МГц}$ по формулам (1)–(8).

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Результаты расчетов приведены на рис. 3–6. Из рис. 3 видно, что ПАВ-резонатор хорошо шунтирует ВШП на частотах ниже 433 МГц, так как его импеданс оказывается значительно ниже 50 Ом (около 6 Ом), но на частотах выше 433 МГц импеданс ПАВ-резонатора становится несколько больше (около 20 Ом) и потому слабее шунтирует отражательный ВШП. Это накладывает ограничения на расстояние между ВШП, поскольку изрезанность входного сопротивления или параметра S_{11} , обусловленная отражением ПАВ от отражательного ВШП, накладывается на резонансный пик и может его существенно уменьшить и расширить.

Из рис. 5 видно, что если добротность пика (отношение центральной частоты к ширине полосы пропускания по уровню 3 дБ) была около 3300, то при изменении расстояния до 100 длин ПАВ добротность становится меньше 1000. Расчеты показывают, что при расстоянии между ВШП 200–250 длин ПАВ на центральной частоте добротность пика не меняется, хотя происходит уменьшение резонансной частоты на 0,04 МГц при росте расстояния между ВШП от 200 до 250 длин ПАВ. Так как при росте температуры ниобат лития будет расширяться, то расстояние между ВШП будет увеличиваться, что приведет к незначительному уменьшению частоты резонансного пика. Но если ПАВ-резонатор конструктивно выполнен на той же подложке, что и ЛЗ, то при росте температуры резонансная частота также будет понижаться [6, 7]. Это означает, что зависимость частоты резонансного пика ПАВ-резонатора от температуры не будет ослабляться из-за зависимости этой частоты от расстояния между ВШП ЛЗ [8].

Как показывают произведенные расчеты, изменение шунтирующей емкости в ПАВ-резонаторе (см. рис. 1) на величину, равную 10 % от емкости приемопередающего ВШП, приводит к изменению частоты ПАВ-резонатора на 0,0012 %. В то же время изменение емкости приемопередающего ВШП на ту же величину путем подсоединения к нему дополнительной емкости не приводит к изменению резонансного пика на частотной зависимости параметра S_{11} на 0,0008 %, хотя это изменение по отношению к шунтирующей емкости составляет 2.6 %.

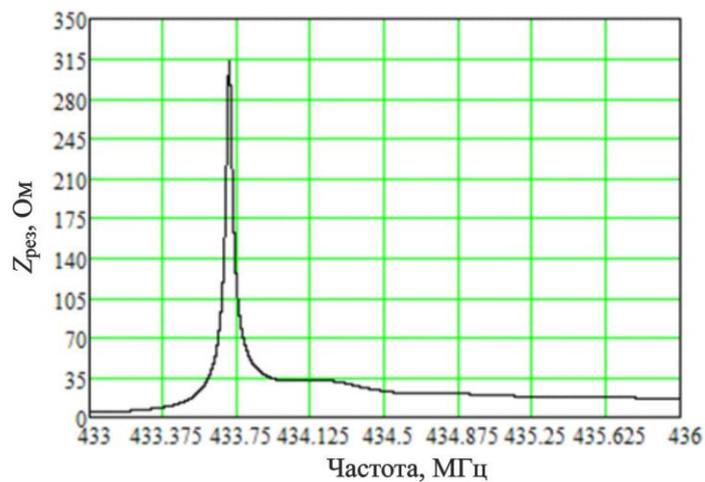


Рис. 3. Частотная зависимость импеданса ПАВ-резонатора

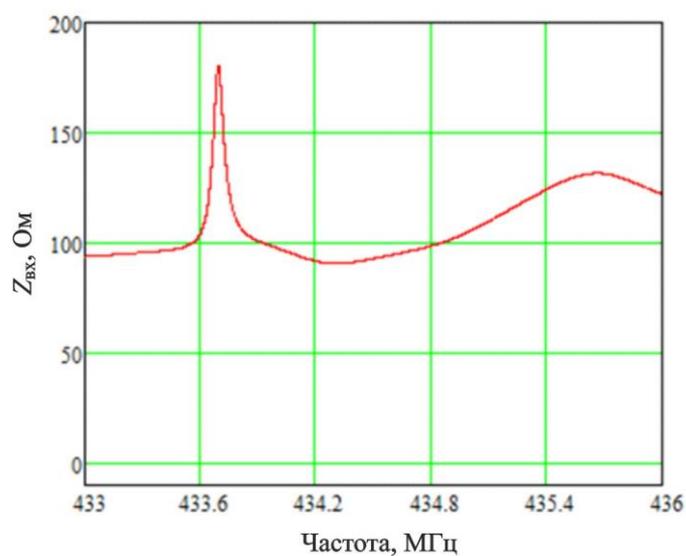


Рис. 4. Частотная зависимость входного сопротивления ЛЗ на ПАВ, в которой к отражательному ВШП подсоединен ПАВ-резонатор при расстоянии между ВШП, равном 250 длин ПАВ на центральной частоте

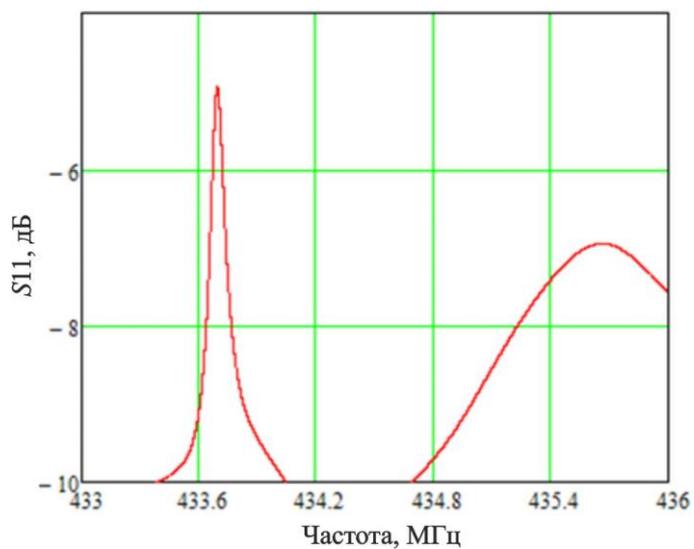


Рис. 5. Частотная зависимость параметра S_{11} ЛЗ на ПАВ, в которой к отражательному ВШП подсоединен ПАВ-резонатор при расстоянии между ВШП, равном 200 длин ПАВ на центральной частоте

ДАТЧИК ТЕМПЕРАТУРЫ НА ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ
НА ОСНОВЕ ЛИНИИ ЗАДЕРЖКИ И РЕЗОНАТОРА

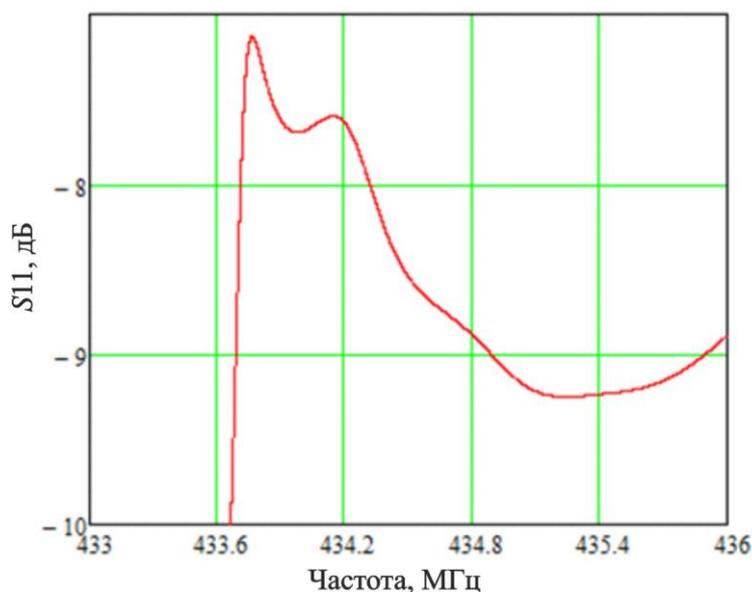


Рис. 6. Частотная зависимость параметра S_{11} ЛЗ на ПАВ, в которой к отражательному ВШП подсоединен ПАВ-резонатор при расстоянии между ВШП, равном 100 длин ПАВ на центральной частоте

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, использование ЛЗ на ПАВ ослабляет влияние внешних емкостей на резонансный пик параметра S_{11} по сравнению с влиянием их на резонансный пик ПАВ-резонатора, что повышает точность измерения температуры. Это подтверждается тем, что при подсоединении емкости, равной 10 % от емкости приемо-передающего ВШП ЛЗ на ПАВ к ПАВ-резонатору, приводит к изменению резонансной частоты на 0.0012 %, а подсоединение этой же емкости к приемо-передающему ВШП ЛЗ на ПАВ приводит к изменению резонансного пика параметра S_{11} на 0.0008 %. При этом внешняя емкость составляет 2.5 от шунтирующей емкости ПАВ-резонатора и 10 % от емкости приемо-передающего ВШП ЛЗ на ПАВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сорокин А.В., Калинин В.А., Кислицын В.О. Патент на промышленный образец № 115729. Дата публикации: 05.08.2019. Бюл. № 8.
2. Karapetyan G.Ya., Kaydashev V.E., Kuterov M.E., Minasyan T.A., Kalinin V.A., Kislitsyn V.O. and Kaydashev E.M. Tunable high-Q SAW resonator loaded on a

changing capacitance // Journal of advanced dielectrics. 2020. Vol. 10. Nos. 1 & 2. 2060009 (6 pages).

3. Карпетьян Г.Я., Багдасарян С.А., Багдасарян Н.А. Однонаправленный преобразователь поверхностных акустических волн. Патент на изобретение РФ 2195069, МПК H03H 9/145 (2000.01), 2002. Бюл. № 35.

4. Морган Д. Устройства обработки сигналов на поверхностных акустических волнах. М.: Радио и связь, 1990. 416 с.

5. Дворников А.А., Огурцов В.И., Уткин Г.М. Стабильные генераторы с фильтрами на поверхностных акустических волнах. М.: Радио и связь, 1983. 136 с.

6. Устройство считывания изображений на поверхности акустических волн с помощью встречно-штыревых преобразователей на подложке из сульфида кадмия / Г.Я. Карпетьян, В.Ф. Катаев, В.Г. Днепровский, Н.В. Ермолаева // Вест. Нац. исслед. ядер. ун-та «МИФИ». 2016. Т. 5. № 2. С. 110–115.

7. Датчик тока с магниточувствительной пленкой. В.О. Кислицын, В.А. Калинин, Г.Я. Карпетьян, В.Ф. Катаев, Н.В. Ермолаева // Вест. Нац. исслед. ядер. ун-та «МИФИ». 2021. Т. 10. № 1. С. 63–69.

8. Чувствительные элементы пассивных беспроводных датчиков на поверхностных акустических волнах для измерения тока в трехфазных цепях / В.О. Кислицын, В.А. Калинин, Г.Я. Карпетьян, В.Ф. Катаев, Н.В. Ермолаева // Вест. Нац. исслед. ядер. ун-та «МИФИ». 2020. Т. 9. № 2. С. 177–183.

SURFACE ACOUSTIC WAVE TEMPERATURE SENSOR BASED ON DELAY LINE AND RESONATOR

V.O. Kislitsyn^{a,*}, G.Ya. Karapetyan^b, V.F. Kataev^{c,}, B.M. Seredin^d, N.V. Ermolaeva^{c,***}**

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

^b *Southern Federal University, 344090, Russia*

^c *Volgodonsk Engineering–Technical Institute, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Volgodonsk, Rostov region, 347360 Russia*

^d *Platov South- Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Rostov region, 346428, Russia*

**e-mail: kislitsyn@rfsaw.ru*

***e-mail: kataev.v.f.@gmail.com*

****e-mail: ermolv@mail.ru*

Received January 17, 2023; revised January 30, 2023; accepted February 7, 2023

The results of studies of a temperature sensor based on a delay line and a resonator based on surface acoustic waves are presented. A method for calculating such a sensor is developed under the condition that the reflective interdigital delay line converter contains split electrodes and a resonator is connected to it. The sensor was calculated for a frequency of 433 MHz. It is shown that the effect of external capacitances on the resonant frequency when connected to a receiving-transmitting interdigital transducer is significantly less than when they are connected directly to the resonator. In this case, the SAW resonator has only an acoustic connection with the antenna, and the influence of the antenna and surrounding objects on the resonant frequency will be absent. It is noted that the use of delay lines on surface acoustic waves weakens the effect of external capacitances on the resonant peak of parameter S_{11} compared to their effect on the resonant peak of the SAW resonator, which increases the accuracy of temperature measurement. The temperature sensor proposed in this paper is recommended to be used to automate the processes of monitoring the temperature conditions of the operating high-voltage electrical equipment of transformer and distribution substations.

Keywords: surface acoustic waves (surfactants), counter-pin converter (VSHP), delay line on surfactants, surfactant resonator, parameter S_{11} .

REFERENCES

1. Sorokin A.V., Kalinin V.A., Kislitsyn V.O. Patent na promyshlennyj obrazec № 115729 [Patent for industrial design No.115729]. 2019. Bull. No. 8.
2. Karapetyan G.Ya., Kaydashev V.E., Kutepov M.E., Minasyan T.A., Kalinin V.A., Kislitsyn V.O and Kaidashev E.M. Tunable high-Q SAW resonator loaded on a changing capacitance. Journal of advanced dielectrics, 2020. Vol. 10. Nos. 1 & 2 (2020) 2060009 (6 pages).
3. Karapetjan G.Ja., Bagdasarjan S.A., Bagdasarjan N.A. Odonapravlenyj preobrazovatel' poverhnostnyh akusticheskikh voln [Unidirectional transducer of surface acoustic waves]. Patent RF. No. 2195069. IPC H03H 9/145 (2000.01). 2002. Bull. No. 35.
4. Morgan D. Ustrojstva obrabotki signalov na poverhnostnyh akusticheskikh volnah [Devices for processing signals on surface acoustic waves]. M.: Radio i svyaz' Publ. 1990. 416 p.
5. Dvornikov A.A., Ogurcov V.I., Utkin G.M. Stabil'nye generatory s fil'trami na poverhnostnyh akusticheskikh volnah [Stable generators with filters on surface acoustic waves]. M.: Radio i svyaz' Publ. M.: Radio i svyaz'. 1983. 136 p.
6. Karapet'yan G.YA., Kataev V.F., Dneprovskij V.G., Ermolaeva N.V. Ustrojstvo schityvaniya izobrazhenij na poverhnostnyh akusticheskikh volnah s pomoshch'yu veernyh vstrechno-shtyrevykh preobrazovatelej na podlozhke iz sul'fida kadmiya [Device for reading images on surface acoustic waves using fan-shaped interdigital transducers on a cadmium sulfide substrate]. Vestnik NIYaU MIFI. 2016. Vol. 5. No. 2. P. 110–115 (in Russian).
7. Kislicyn V.O., Kalinin V.A., Karapet'yan G.YA., Kataev V.F. Ermolaeva N.V. Datchik toka s magnitochuvstvitel'noj plenkoj [Current sensor with magnetic film]. Vestnik NIYaU MIFI. 2021. Vol. 10. No. 1. P. 63–69 (in Russian).
8. Kislicin V.O., Kalinin V.A., Karapetyan G.Ya., Kataev V.F., Ermolayeva N.V. Chuvstvitel'nye elementy passivnyh besprovodnyh datchikov na poverhnostnyh akusticheskikh volnah dlya izmereniya toka v trekhfaznyh cepyah [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. P. 177–183 (in Russian).