

УДК 621.311.16:621.315.05:681.89

## ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ПАССИВНЫХ БЕСПРОВОДНЫХ ДАТЧИКОВ НА ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТОКА В ТРЕХФАЗНЫХ ЦЕПЯХ

© 2020 г. В. О. Кислицын<sup>1</sup>, В. А. Калинин<sup>1</sup>, Г. Я. Карапетьян<sup>1</sup>, В. Ф. Катаев<sup>2</sup>, Н. В. Ермолаева<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup> Научно-технический центр “Радиотехнических Устройств и Систем”, Санкт-Петербург, 199178, Россия

<sup>2</sup> Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета “МИФИ”, Волгодонск, 347360, Россия

\*e-mail: ermolv@mail.ru

Поступила в редакцию 02.04.2020 г.

После доработки 23.06.2020 г.

Принята к публикации 23.06.2020 г.

Приведены результаты исследований чувствительных элементов датчиков тока для трехфазных цепей на основе линий задержки на поверхностных акустических волнах, в которой величина импеданса, подсоединенного к отражательному встречно-штыревому преобразователю зависит от тока в токопроводящей шине. Импеданс представляет собой последовательно соединенные катушку индуктивности с ферритовым сердечником и емкость. Индуктивность меняется под действием магнитного поля, создаваемого током, а емкость – под действием напряжения, индуцируемого в обмотке, намотанной на магнитопровод, расположенный вокруг токопроводящего провода или шины. Исследования показали, что для измерения переменного тока лучше использовать замкнутые магнитопроводы без постоянного магнита, но с намотанной на него обмоткой, напряжение с которой подается через диоды на варикапы либо на дополнительную обмотку, расположенную на ферромагнитном сердечнике магниточувствительной индуктивности. В этом случае положительная и отрицательная полуволны переменного тока измеряются независимо, что позволяет судить о нелинейных искажениях в электросети и более точно оценивать расход электроэнергии. Применение в контуре варикапа в качестве конденсатора позволяет существенно повысить чувствительность и точность измерения тока. Использование прореженных встречно-штыревых преобразователей позволяет существенно сузить полосу рабочих частот, что дает возможность измерения токов одновременно на трех фазах в диапазоне разрешенных частот 2400–2483 МГц. В целом, применение датчиков новой конструкции позволит расширить динамический диапазон измеряемых токов.

**Ключевые слова:** встречно-штыревой преобразователь, поверхностные акустические волны, линия задержки, магнитопровод, варикап, ферритовый сердечник, бесконтактный датчик тока

DOI: 10.1134/S2304487X20020066

### ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] показано, что в качестве пассивных беспроводных датчиков для измерения токов в трехфазных цепях перспективно использовать датчики на основе линий задержки (ЛЗ) на поверхностных акустических волнах (ПАВ). Такая ЛЗ содержит узкополосные приемно-передающий и отражательные встречно-штыревые преобразователи (ВШП). Причем отражательный ВШП нагружается на импеданс, величина которого зависит от тока в токопроводящей шине, ток в которой необходимо измерять. Анализ работ [2–9] показал, что все предлагаемые пассивные чувствительные к току элементы основаны на изменении проводимости этих элементов под действием магнитного поля тока, который необходимо измерить. Однако в настоящее время все такие

материалы находятся на исследовательской стадии. В настоящей работе предлагается использовать в качестве импеданса последовательно соединенные катушку индуктивности и емкость, величины которых могут зависеть от тока в шине. При этом используются хорошо известные ферромагнитные материалы, если катушка индуктивности, намотанная на ферромагнитное кольцо, помещена в зазор магнитопровода, расположенного вокруг токопроводящей шины, или варикапы, емкость которых будет изменяться под действием напряжения, в обмотке, намотанной на магнитопровод.

### ВЫБОР КОНСТРУКЦИИ МАГНИТОЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА

Из рис. 1 следует, что нагрузка к отражательным ВШП представляет собой последовательный

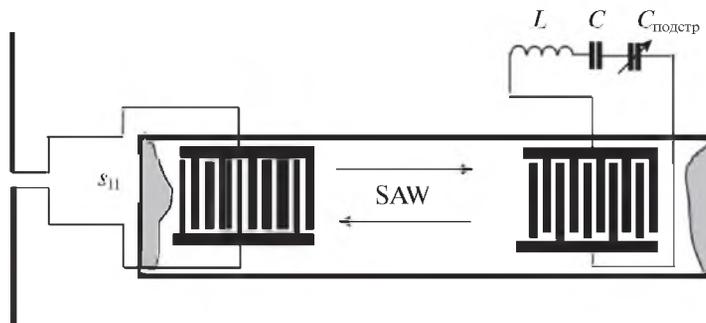


Рис. 1. Конструкция ЛЗ для датчика.

контур, в котором катушка индуктивности имеет добротность  $Q$ , т.е. имеет почти реактивный характер при  $Q \gg 1$ . Под действием магнитного поля индуктивность может меняться в два и более раз [10]. Катушка индуктивности, намотанная на ферромагнитный сердечник, меняет свою индуктивность, так как изменяется под действием магнитного поля магнитная проницаемость ферромагнитного сердечника, которой пропорциональна индуктивность.

Катушка индуктивности, намотанная на ферромагнитный сердечник, меняет свою индуктивность, так как изменяется под действием магнитного поля магнитная проницаемость ферромагнитного сердечника, которой пропорциональна индуктивность. Катушка индуктивности с ферромагнитным сердечником помещается в зазор магнитопровода, расположенного вокруг токопроводящей шины (рис. 2).

Чтобы отличать положительную и отрицательную полуволны переменного тока, в магнитопровод вводится постоянный магнит (рис. 2). В этом случае при одной полярности тока магнитное поле в зазоре будет складываться с магнитным полем постоянного магнита, а при другой полярности — вычитаться. Контур, подсоединенные к

отражательным ВШП, настраиваются таким образом, чтобы изрезанность параметра  $S_{11}$  была бы минимальной. При этом в контуре индуктивность, которая не помещается в зазор магнитопровода, должна быть аналогичной контуру, индуктивность которого помещается в зазор магнитопровода. В этом случае, при изменении температуры не будет происходить разбалансировка отражений от обоих отражательных ВШП, поскольку изменение индуктивности от температуры будет одинаково. На рис. 3 показана зависимость коэффициента отражения от величины тока в шине, вокруг которой расположен магнитопровод, когда катушка индуктивности внешнего импеданса намотанная на ферритовом кольце, расположена в зазоре магнитопровода.

Из рис. 3 видно, что эта зависимость не симметрична относительно нуля тока: она сильно зависит от тока при положительной полуволне тока и слабо зависит от отрицательной полуволны тока. В результате, данная конструкция позволяет достоверно измерять только положительную полуволну тока. Это может привести к потере ин-

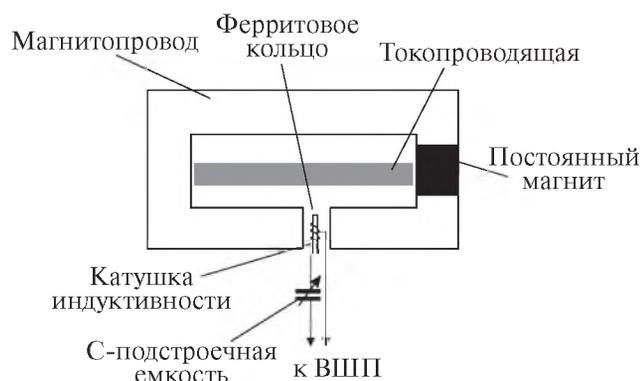


Рис. 2. Магнитопровод с зазором и постоянным магнитом.

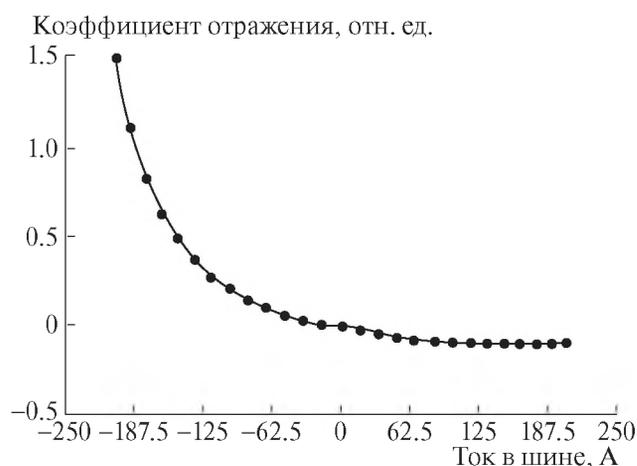


Рис. 3. Зависимость коэффициента отражения от датчика от силы тока в шине.

формации об нелинейных искажениях, возникающих в электросети, связанных с потерей симметричности переменного тока относительно нуля. Для того, чтобы измерять обе полуволны, необходим еще один измерительный канал. В нем индуктивность внешнего импеданса расположена в зазоре другого магнитопровода, в котором полярность постоянного магнита противоположна полярности магнита в первом магнитопроводе.

Центральные частоты в этом датчике сдвинуты таким образом, что на ближайших частотах АЧХ ВШП пересекаются на уровне не менее 20 дБ. В этом случае возникает необходимость установки не одного, а двух магнитопроводов, в которых постоянные магниты имеют противоположные полярности. Чтобы избежать установки двух магнитопроводов, можно использовать замкнутый магнитопровод с обмоткой на нем, которая подсоединяется к обмотке, дополнительно намотанной на сердечник катушки индуктивности внешнего импеданса. При соединении этой обмотки с дополнительной обмоткой катушки индуктивности приводит к модуляции магнитной проницаемости сердечника катушки, а, следовательно, и к модуляции индуктивности и коэффициента отражения ПАВ от отражательного ВШП. В этом случае магнитопровод необязательно должен находиться вблизи датчика, поскольку обмотка магнитопровода и дополнительная обмотка катушки индуктивности соединяются с помощью проводов, так как частота тока равна 50 Гц и длина этих проводов не имеет значения. Эти провода подсоединяются к дополнительной обмотке через дроссель, сопротивление которого на рабочих частотах датчика намного больше, чем на частоте 50 Гц, и не влияют на работу датчика. Измерения показали, что если использовать в датчике, работающем в диапазоне частот 95–100 МГц, в качестве индуктивности ферритовое кольцо диаметром 4 мм, содержащее шесть витков провода диаметром 0,2 мм, намотать дополнительную обмотку в 30 витков проводом диаметром 0,2 мм, то током до 1 А можно управлять коэффициентом отражения ПАВ от ВШП в два раза. Конечно, ток в 1 А — это достаточно большой ток. Но его можно существенно уменьшить, если число витков увеличить до 1000 витков, а диаметр провода уменьшить до 0,06 мм (стандартное значение диаметра намоточного провода). Тогда ток станет менее 0,3 А. Но при таком диаметре провода можно намотать на кольцо и 1000 витков, что позволит уменьшить ток до 30 мА. Кроме того, эксперименты показали, что, используя подмагничивание с помощью постоянного магнита можно смещать рабочую точку изменения индуктивности таким образом, чтобы с ростом тока коэффициент отражения будет все время убывать с ростом тока, что позволит расширить динамический диапазон измеряемых токов (рис. 3).

Используя датчики новой конструкции, где есть возможность эффективно управлять коэффициентом отражения ПАВ от ВШП, можно изменять коэффициент отражения отражательного ВШП на одном частотном канале положительной полуволной тока и изменять коэффициент отражения ВШП в другом частотном канале отрицательной полуволной тока. Кроме того, сам датчик может быть расположен даже не на токопроводящей шине, а в удобном месте для связи со считывателем. Связь с токопроводящей шиной, в этом случае осуществляется с помощью обмотки, намотанной на магнитопровод и пары проводов и диодов, которые направляют сигнал от положительной полуволны тока на первый канал, а сигнал от отрицательной полуволны — на другой канал. В качестве диодов можно использовать диод Д226Б, который имеет допустимое обратное напряжение 400 В и прямой ток 300 мА. Если положить, что при токе в шине в 10 А на обмотке будет напряжение 1 В и ток в обмотке будет около 1 мА. Тогда при токе 1000 А напряжение на обмотке будет 100 В и ток 100 мА, то такие диоды будут работать в пределах допустимых параметров. Кроме того, при больших токах магнитопровод может прийти в насыщение и ток на обмотке будет расти медленнее, чем ток в шине. Для защиты дополнительной обмотки от перегрева при скачке тока (КЗ) параллельно обмотке подключается варистор, который при определенном напряжении резко уменьшает свое сопротивление, пропуская почти весь ток через себя (рис. 3). После прекращения КЗ сопротивление варистора восстанавливается.

В такой конструкции нет необходимости использовать опорный канал, поскольку, когда датчик измеряет положительную полуволну тока, в качестве опорного датчика может служить датчик, который измеряет отрицательную полуволну тока, так как индуктивность в этом датчике не будет меняться в течение полупериода, поскольку диод не пропускает ток на дополнительную обмотку катушки индуктивности. При отрицательной волне тока, наоборот, датчик, который был измерительным при положительной волне тока, станет опорным (рис. 4).

Можно также использовать и изменение емкости под действием магнитного поля, если расстояние между обкладками будет меняться под действием магнитного поля. Но при переменном токе это приведет к тому, что обкладки такого конденсатора будут постоянно вибрировать с частотой переменного тока, что может быстро привести к выходу из строя такого конденсатора. Изменение емкости из-за изменения диэлектрической проницаемости под действием магнитного поля (магнитоэлектрический эффект) слишком мало, чтобы его практически использовать. Но изменение емкости все же можно использовать,

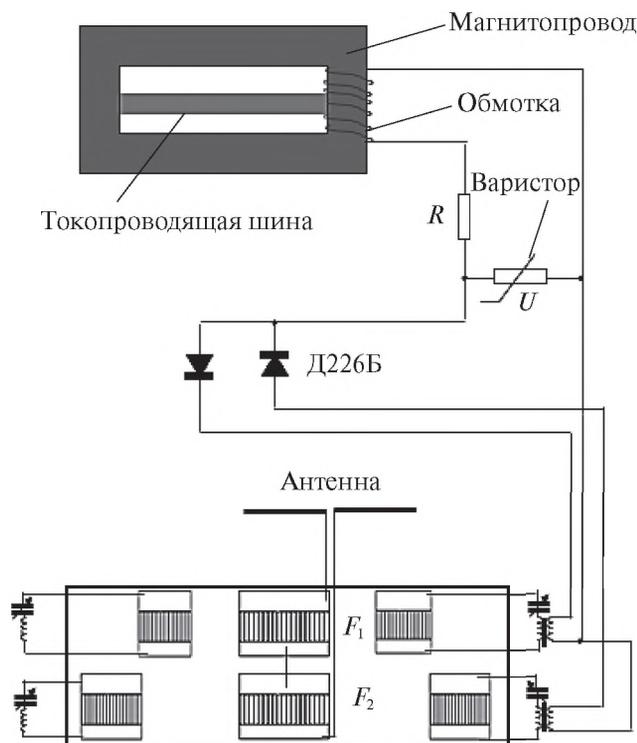


Рис. 4. Датчик тока на ПАВ для измерения переменного тока с управляемой индуктивностью.

если использовать варикапы. В этом случае емкость будет зависеть от напряжения, приложенного к варикапу. Это напряжение можно получить от обмотки, намотанной на замкнутый вокруг токопроводящей шины магнитопровод.

Варикап Д901 имеет обратное напряжение 80 В, Д902 – 25 В, КВ106 – 120 В, 2В102 – 80 В. Это означает, что при напряжении на обмотке в 1 В при токе в шине 10 А на диод может быть подано напряжение до 1 В, а при токе в шине 1000 А напряжение на обмотке будет 100 В. Как видно, это не превысит предельного напряжения варикапа КВ106, или двух последовательно соединенных варикапов Д901. Так как ток на варикапах будет всегда иметь одно и тоже направление, то нет необходимости постоянного напряжения для создания рабочей точки. Кроме того, нет необходимости в изготовлении моточных компонентов на ферритовых сердечниках. Дроссели имеют индуктивное сопротивление ВЧ сигнала в сотни кОм, а для 50 Гц несколько Ом. Поэтому обмотка на магнитопроводе не будет влиять на параметры импеданса, подсоединенного к отражательным ВШП. В отличие от индуктивности, которая изменяется не более чем в два раза под действием магнитного поля и имеет максимум, емкость варикапа при увеличении приложенного к нему обратного напряжения всегда уменьшается, причем изменяться более чем в пять раз.

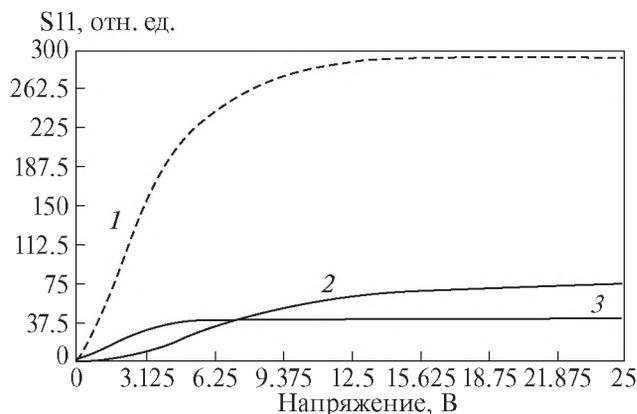


Рис. 5. Зависимость коэффициента отражения датчика в зависимости от приложенного к варикапу напряжения: 1 – варикап Д901, 2 – варикап КВ102, 3 – варикап Д902.

На рис. 5 показано изменение коэффициента отражения от датчика в зависимости от напряжения, прилагаемого к нему. Видно, что при применении варикапов изменение коэффициента отражения значительно превышает его изменение при применении управляемой магнитным полем индуктивности. Это дает возможность существенно повысить чувствительность и точность измерения тока такими датчиками.

Экспериментально было установлено, что в сердечнике из феррита при 100 витках при токе в шине 4 А напряжение на обмотке было 0.2 В, в сердечнике из железа при 60 витках было получено напряжение 2 В при токе в шине 4 А. Это означает, что напряжение в 1 В при токе в шине 10 А вполне возможно при числе витков в 100–200 в обмотке на магнитопроводе. При увеличении тока до 1000 А это напряжение повысится до 100 В, если в сердечнике не будет насыщения. Если возник импульс перенапряжения, варистор из-за нелинейности характеристики уменьшает свое сопротивление практически до нуля. Нагрузка шунтируется, а поглощенная энергия рассеивается в виде тепла. Варистор не обладает инерцией, поэтому после “срезания” импульса он мгновенно снова приобретает очень большое сопротивление. В варисторах напряжение срабатывания варьируется в зависимости от марки от 18 до 1800 В. При этом кратковременный ток, который может выдержать варистор без поломки, составляет сотни ампер в течение 20 мкс.

Так как в датчиках используются узкополосные ВШП с различными центральными частотами, то для измерения трехфазного тока датчики располагаются на трех токопроводящих шинах или проводах (рис. 6). При этом центральные частоты подбираются таким образом, что АЧХ соседних частотных каналов пересекаются на уров-

не более 20 дБ. Таким образом, получается шесть каналов (по два на каждую фазу). Учитывая, что диапазон разрешенных частот находится в пределах 2400 МГц–2483 МГц, частоты каналов будут различаться на  $80/6 = 13.3$  МГц. Тогда частоты каналов будут соответственно равны: 2410 МГц, 2423.3 МГц (первая фаза); 2436.6 МГц, 2449.9 МГц (вторая фаза); 2463.2 МГц, 2476.5 МГц (третья фаза).

Задержки в опорных каналах для каждой фазы отличаются от задержек в измерительных каналах на удвоенную величину длительности считываемого импульса. В этом случае отраженные от датчика импульсы не будут перекрываться, что повысит точность измерения. Это необходимо сделать, поскольку в импульсном режиме считывающий импульс с частотой заполнения равной частоте первого опорного канала будет также отражаться в измерительном канале с амплитудой в шесть раз меньшей, что может повлиять на точность измерения, когда ток будет проходить нулевые значения.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате выбора конструкции магниточувствительного элемента было показано, что наиболее эффективно использовать емкость, либо индуктивность. Показано, что индуктивность может располагаться непосредственно в зазоре магнитопровода с постоянным магнитом (для определения полярности тока), расположенного вокруг токопроводящей шины. Однако такой метод не позволяет достаточно хорошо измерять обе полярности тока. Поэтому было предложено управлять индуктивностью или емкостью контура с помощью обмотки, намотанной на магнитопровод, расположенный вокруг токопроводящей шины. При этом необходимость в постоянном магните отпадает, что упрощает конструкцию магнитопровода. Напряжение с обмотки подается на обмотку расположенной на одном сердечнике индуктивности контура, причем напряжение подается через диод. Это позволяет измерять токи разных полярностей отдельно, просто используя для каждого направления тока отдельную ЛЗ. В этом случае под действием напряжения в обмотке на магнитопроводе в обмотке сердечника индуктивности возникает ток, магнитное поле которого изменяет индуктивность, а, следовательно, и коэффициент отражения опорного сигнала от датчика. Если это напряжение подать на варикап, который используется в контуре в качестве конденсатора, то его емкость будет меняться в соответствии с током в шине, что приведет также к изменению коэффициента отражения от датчика под действием тока в шине. Измерения показали, что при применении варикапов изменение коэффициента отражения значительно

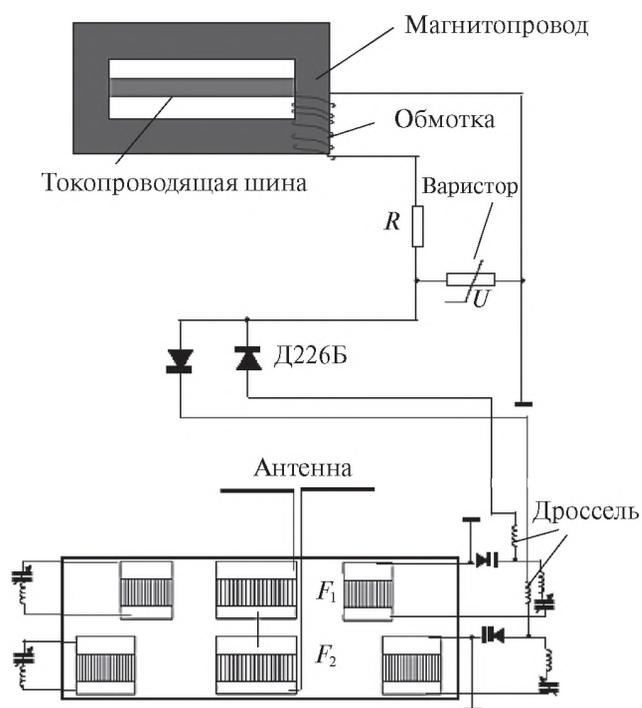


Рис. 6. Датчик тока на ПАВ для измерения переменного тока на основе варикапов.

превышает его изменение при применении управляемой магнитным полем индуктивности. Это дает возможность существенно повысить чувствительность и точность измерения тока такими датчиками. Использование прореженных ВШП позволяет существенно сузить полосу рабочих частот, что дает возможность измерения токов одновременно на трех фазах в диапазоне разрешенных частот 2400–2483 МГц.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемые в настоящей работе пассивные беспроводные датчики на ПАВ можно с успехом применять для измерения тока в трехфазных линиях электропередачи и распределительных шкафах. При этом в качестве чувствительных элементов можно использовать катушки индуктивности, намотанные на ферромагнитный сердечник, которые помещаются в зазор магнитопровода, расположенного вокруг токопроводящего провода или шины. Для измерения переменного тока лучше использовать замкнутые магнитопроводы без постоянного магнита, но с намотанной на него обмоткой, напряжение с которой подается через диоды на варикапы либо на дополнительную обмотку, расположенную на ферромагнитном сердечнике магниточувствительной индуктивности. В этом случае положительная и отрицательная полуволны переменного тока измеряются не-

зависимо, что позволяет судить о нелинейных искажениях в электросети и более точно оценивать расход электроэнергии. Применение датчиков новой конструкции позволит расширить динамический диапазон измеряемых токов. Использование в контуре варикапа в качестве конденсатора позволяет существенно повысить чувствительность и точность измерения тока.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кислицын В.О., Калинин В.А., Карапетьян 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.
2. 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.
3. Zhou H., Talbi A., Tiercelin N. and Bou Matar O. Multilayer magnetostrictive structure based surface acoustic wave devices // Applied Physics Letters. 2014. V. 104. P. 114101.
4. Hauser H., Steindl R., Hausleitner Ch., Pohl A., Nicolics J. Wirelessly Interrogable Magnetic Field Sensor Utilizing Giant Magneto-Impedance Effect and Surface Acoustic Wave Devices // IEEE T INSTRUM MEAS. 2000. V. 49. P. 648–652.
5. Steindl R., Hausleitner Ch., Pohl A., Hauser H., Nicolics J. Passive wirelessly requestable sensors for magnetic field measurements // Sens Actuators A. 2011. V. 85. P. 169–174.
6. Al Rowais H., Li B., Liang C., Green S., Gianchandani Y., Kosel J. Development of a Passive and Remote Magnetic Microsensor with Thin-Film Giant Magneto-impedance Element and Surface Acoustic Wave Transponder // Appl. Phys. 2001, V. 109. P. 07E524.
7. Li B., M. H., Salem N. P., Giouroudi I., Kosel J. Integration of Thin Film Giant Magneto Impedance Sensor and Surface Acoustic Wave Transponder // Appl. Phys. 2012. V. 111. P. 07E514.
8. Morikawa T., Nishibe Y., Yamadera H., Nonomura Y., Takeuchi M., Taga Y. Giantmagneto-Impedance Effect in Layered Thin Films // IEEE Trans Magn. 2009. V. 33. P. 4367–4372.
9. Дворников А.А., Огурцов В.И., Уткин Г.М. Стабильные генераторы с фильтрами на поверхностных акустических волнах. М.: Радио и связь, 1983. 136 с.
10. Исследование магнитных свойств ферритов. [Электронный ресурс] – URL <https://zdam.sam.ru/a59111.html> (дата обращения: 12.03.2020)

---

Vestnik Natsional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta "MIFI", 2020, vol. 9, no. 2, pp. 177–183

---

## Sensitive Elements of Passive Wireless Sensors on Surface Acoustic Waves for Measuring Current in Three-Phase Circuits

V. O. Kislitsyn<sup>a</sup>, V. A. Kalinin<sup>a</sup>, G. Ya. Karapetyan<sup>a</sup>, V. F. Kataev<sup>b</sup>, and N. V. Ermolaeva<sup>b,#</sup>

<sup>a</sup> Scientific and Engineering Center Rus, St. Petersburg, 199178 Russia

<sup>b</sup> Volgodonsk Engineering Technical Institute,  
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute),  
Volgodonsk, 347360 Russia

<sup>#</sup>e-mail: ermolv@mail.ru

Received April 2, 2020; revised June 23, 2020; accepted June 23, 2020

**Abstract**—Sensitive elements of current sensors for three-phase circuits based on delay lines on surface acoustic waves, where the impedance connected to a reflective counter-pin converter depends on the current in the conducting bus, have been studied. The impedance is a series-connected inductor with a ferrite core and a capacitor. The inductance changes under the influence of the magnetic field created by the current, and the capacitance depends on the voltage induced in the winding wound on a magnetic wire located around a current-conducting wire or bus. It has been shown that it is better to use closed magnetic circuits without a permanent magnet, but with a winding wound on it, the voltage from which is fed through diodes to varicaps or to an additional winding located on a ferrimagnetic core of a magnetically sensitive inductance. In this case, the positive and negative half-waves of the alternating current are measured independently, which allows us to estimate nonlinear distortions in the power grid and more accurately evaluate the power consumption. The use of a varicap circuit as a capacitor can significantly increase the sensitivity and accuracy of current measurement. The use of sparse counter-pin converters allows significantly reducing the operating frequency band, which makes it possible to measure currents simultaneously in three phases in the range of permitted frequencies of 2400–2483 MHz. In general, the use of sensors of the new design will expand the dynamic range of measured currents.

*Keywords:* counter-pin converter, surface acoustic waves, delay line, magnetic conductor, varicap, ferrite core, contactless current sensor

DOI: 10.1134/S2304487X20020066

#### REFERENCES

1. Kislicin V.O., Kalinin V.A., Karapetyan G.Ya., Kartaev 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)
2. Kadota M., Ito S., Ito Y., etc. SAW magnetic sensors composed of various Ni electrode structures on quartz. *IEEE International Ultrasonics Symp.Proc.*, 2011 pp. 805–809.
3. Zhou H., Talbi A., Tiercelin N. and Bou Matar O. Multilayer magnetostrictive structure based surface acoustic wave devices. *Applied Physics Letters*, 2014, vol. 104, p. 114101.
4. Hauser H., Steindl R., Hausleitner Ch., Pohl A., Nicolics J. Wirelessly Interrogable Magnetic Field Sensor Utilizing Giant Magneto-Impedance Effect and Surface Acoustic Wave Devices. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 2000, vol. 49, pp. 648–652.
5. Steindl R., Hausleitner Ch., Pohl A., Hauser H., Nicolics J. Passive wirelessly requestable sensors for magnetic field measurements. *Sens Actuators A*, 2011, vol. 85, pp. 69–174.
6. Al Rowais H., Li B., Liang C., Green S., Gianchandani Y., Kosel J. Development of a Passive and Remote Magnetic Microsensor with Thin-Film Giant Magnetoimpedance Element and Surface Acoustic Wave Transponder. *Appl. Phys.*, 2001, vol. 109, p. 07E524.
7. Li B., M. H., Salem N.P., Giouroudi I., Kosel J. Integration of Thin Film Giant Magneto Impedance Sensor and Surface Acoustic Wave Transponder. *Appl. Phys.* 2012, vol. 111, p. 07E514.
8. Morikawa T., Nishibe Y., Yamadera H., Nonomura Y., Takeuchi M., Taga Y. Giantmagneto-Impedance Effect in Layered Thin Films. *IEEE Trans Magn.*, 2009, vol. 33, pp. 4367–4372.
9. Dvornikov A.A., Ogurtsov V.I., Utkin G.M. *Stabilnyye generatory s filtrami na poverkhnostnykh akusticheskikh volnakh*. [Stable generators with filters on surface acoustic waves]. Moscow, Radio i svyaz., 1983, 136 p.
10. *Issledovaniye magnitnykh svoystv ferritov*. [Research of magnetic properties of ferrites]. Available at: <https://zdamsam.ru/a59111.html> (accessed: 12.03.2020).