

Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2022. Т. 30, № 2
Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Applied Nonlinear Dynamics. 2022;30(2)

Краткое сообщение
УДК 53.082.7
DOI: 10.18500/0869-6632-2022-30-2-233-238

Нелинейное усиление сигнала магнитной индукции в магнитомодуляционном датчике с аморфным ферромагнитным сердечником

О. Л. Сокол-Кутыловский

Институт геофизики имени Ю. П. Булашевца
Уральского отделения РАН, Екатеринбург, Россия
E-mail: s-k52@mail.ru

Поступила в редакцию 8.08.2021, принята к публикации 26.01.2022,
опубликована 31.03.2022

Аннотация. Цель настоящего исследования — показать возможность использования управляемой магнитным полем нелинейности изменения амплитуды в колебательном LC -контуре, содержащем сердечник из аморфного ферромагнитного сплава с компенсированной продольной магнитострикцией, что позволяет получить высокий коэффициент преобразования датчиков слабого магнитного поля, работающих при комнатной температуре. **Методы.** Рассмотрен реализованный на практике метод построения магнитомодуляционных датчиков магнитной индукции с фиксированным магнитным полем смещения, которое соответствует максимальной крутизне нелинейной характеристики колебательного LC -контур с аморфным ферромагнитным сердечником в области автопараметрического резонанса. **Результаты.** Показано, что устойчивый коэффициент преобразования датчика длиной 35 мм на основе LC -контур с автопараметрическим усилением на частоте модуляции 256 кГц может достигать 10 мВ/нТл, что позволяет при имеющейся элементной базе регистрировать сигналы слабого переменного магнитного поля с амплитудой $0.03 \text{ пТл/Гц}^{1/2}$ в частотном диапазоне от 10 до 1000 Гц. Отмечено, что возбуждение датчика слабым гармоническим магнитным полем высокой частоты и постоянное нахождение аморфного ферромагнитного сердечника вблизи состояния технического насыщения значительно снижает уровень собственного магнитного шума магнитомодуляционного датчика. **Заключение.** Магнитомодуляционные датчики с автопараметрическим усилением сигнала магнитной индукции могут найти применение в геофизике, магнитобиологии и биомедицине.

Ключевые слова: магнитомодуляционный датчик, автопараметрический резонанс, нелинейность намагничивания, измерение слабого магнитного поля.

Для цитирования: Сокол-Кутыловский О. Л. Нелинейное усиление сигнала магнитной индукции в магнитомодуляционном датчике с аморфным ферромагнитным сердечником // Известия вузов. ПНД. 2022. Т. 30, № 2. С. 233–238.
DOI: 10.18500/0869-6632-2022-30-2-233-238

Статья опубликована на условиях Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0).

Nonlinear amplification of the magnetic induction signal in a magnetomodulation sensor with an amorphous ferromagnetic core

O. L. Sokol-Kutylovskii

Yu. P. Bulashevich Institute of Geophysics,
Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia
E-mail: s-k52@mail.ru

Received 8.08.2021, accepted 26.01.2022, published 31.03.2022

Abstract. The purpose of this work is to show the possibility of using a magnetic field-controlled nonlinearity of the amplitude change in an oscillatory LC -circuit containing a core made of an amorphous ferromagnetic alloy with compensated longitudinal magnetostriction, which makes it possible to obtain a high conversion coefficient of weak magnetic field sensors operating at room temperature. **Methods.** A practical method for constructing magnetomodulation sensors of magnetic induction with a fixed magnetic displacement field, which corresponds to the maximum steepness of the nonlinear characteristic of an oscillatory circuit with an amorphous ferromagnetic core in the region of autparametric resonance, is considered. **Results.** It has been shown that the stable conversion factor of a 35 mm long sensor based on an oscillatory circuit with autparametric amplification at a modulation frequency of 256 kHz can reach 10 mV/nT, which allows, with the available element base, to record signals of a weak alternating magnetic field with an amplitude of $0.03 \text{ pT/Hz}^{1/2}$ in the frequency range 10...1000 Hz. It is noted that the excitation of the sensor by a weak harmonic magnetic field of a high frequency and the constant presence of the amorphous ferromagnetic core near the state of technical saturation significantly reduces the level of intrinsic magnetic noise of the magnetomodulation sensor. **Conclusion.** Magnetomodulation sensors with autparametric amplification of the magnetic induction signal can find application in geophysics, magnetobiology and biomedicine.

Keywords: magnetomodulation sensor, autparametric resonance, magnetization nonlinearity, weak magnetic field measurement.

For citation: Sokol-Kutylovskii OL. Nonlinear amplification of the magnetic induction signal in a magnetomodulation sensor with an amorphous ferromagnetic core. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*. 2022;30(2):233–238.

DOI: 10.18500/0869-6632-2022-30-2-233-238

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0).

Введение

Измерение слабого магнитного поля низких частот с амплитудой менее 1 пТл остается одним из востребованных направлений современных прикладных исследований в геофизике, магнитобиологии и биомедицине. Несмотря на большое количество имеющихся датчиков магнитного поля продолжается их совершенствование и идет разработка новых методов измерения магнитной индукции. Это связано как с техническими особенностями разработанных приборов, так и с условиями и методами их работы. Индукционные датчики надежны и просты в изготовлении, но для работы на низких частотах они имеют достаточно большие размеры, измеряют не магнитную индукцию, а ее производную по времени, что делает их практически непригодными для измерения широкополосных сигналов и сигналов магнитного поля низких частот близко расположенных к ним объектов [1]. Феррозондовые приборы имеют относительно высокий уровень собственного магнитного шума ($5...10 \text{ пТл/Гц}^{1/2}$), хотя в последнее время появились сообщения о феррозондах с ортогональным возбуждением, имеющих порог чувствительности $2 \text{ пТл/Гц}^{1/2}$ [2]. Квантовые магнитометры с оптической накачкой измеряют модуль магнитной индукции и требуют постоянного подогрева паров рабочего вещества. Использование в квантовых магнитометрах с оптической накачкой твердотельного датчика в виде кристалла алмаза с замещением части атомов углерода атомами азота позволяет получить высокую чувствительность только при использовании

ферритового концентратора магнитного потока [3]. Самыми совершенными векторными магнитометрами считаются низкотемпературные сверхпроводящие квантовые интерференционные детекторы (СКВИДы), которые имеют порог чувствительности $1 \text{ фТл/Гц}^{1/2}$ [4], но они работают при температуре около 4 К, что резко ограничивает их широкое применение. Разработанные позднее высокотемпературные СКВИДы по порогу чувствительности приближаются к низкотемпературным СКВИДам, но также требуют применения криогенной техники, так как работают при температуре жидкого азота [5].

1. Магнитомодуляционные датчики с автопараметрическим усилением

Создание высокочувствительных датчиков магнитного поля с автопараметрическим усилением сигнала магнитной индукции стало возможным с появлением аморфных ферромагнитных сплавов с компенсированной продольной магнитострикцией, получаемых методом быстрой заковки из расплава. Отсутствие кристаллической решетки в аморфных ферромагнитных сплавах приводит к тому, что механическое напряжение является действующим фактором первого порядка, как и внешнее магнитное поле [6]. В результате этого механическое напряжение может обратимо привести аморфный ферромагнетик в состояние, подобное насыщению его внешним магнитным полем. При этом в аморфных ферромагнетиках, полученных методом быстрой заковки из расплава, возникает эффективное прямое и обратное магнитноупругое взаимодействие, которое имеет место даже в аморфных ферромагнитных сплавах с компенсированной продольной магнитострикцией. При возбуждении аморфных ферромагнетиков внешним магнитным полем, из-за четности магнитноупругих эффектов, после обратного магнитноупругого преобразования в них, кроме первичного сигнала возбуждения, появляются сигналы магнитного поля четных гармоник частоты возбуждения. При этом амплитуда ряда гармоник может быть сопоставима с амплитудой сигнала возбуждения. В LC -контуре с аморфным ферромагнитным сердечником при определенном соотношении частоты и амплитуды модуляции, во внешнем магнитном поле, направленном вдоль аморфного ферромагнитного сердечника, возникает автопараметрический резонанс, приводящий к скачкообразному изменению амплитуды напряжения на LC -контуре.

На рисунке показана типовая экспериментальная зависимость амплитуды напряжения U на колебательном LC -контуре с аморфным ферромагнитным сердечником от величины внешнего постоянного магнитного поля H , направленного вдоль продольной оси аморфного ферромагнитного сердечника в области параметрического резонанса. При превышении уровня возбуждения сердечника возникает скачкообразное изменение амплитуды напряжения на LC -контуре (рис. а). Направление намагничивания показано стрелками. Пунктирные линии показывают разрывы зависимости и соответствуют скачкам амплитуды напряжения. При уменьшении амплитуды возбуждения LC -контур расстояние между скачками (гистерезис) уменьшается и, начиная с некоторой амплитуды возбуждения, нелинейная резонансная зависимость амплитуды напряжения на LC -контуре становится непрерывной (рис. б). Здесь область максимальной крутизны преобразования отмечена овалом, а пунктирной линией показана нерезонансная зависимость амплитуды напряжения на LC -контуре.

При неизменной частоте и амплитуде магнитного поля модуляции амплитуда напряжения на LC -контуре зависит только от величины составляющей внешнего магнитного поля, совпадающей с продольной осью аморфного ферромагнитного сердечника. Так как зависимость «амплитуда напряжения – магнитная индукция» на LC -контуре нелинейная и неоднозначная, то для измерительных целей ее необходимо преобразовать в линейную и сделать однозначной. Линеаризация этой зависимости технически достигается тем, что магнитное поле смещения, соответствующее выбранному коэффициенту преобразования, поддерживается системой отрицательной обратной связи по магнитному полю, а измеряемый сигнал снимается с катушки обратной

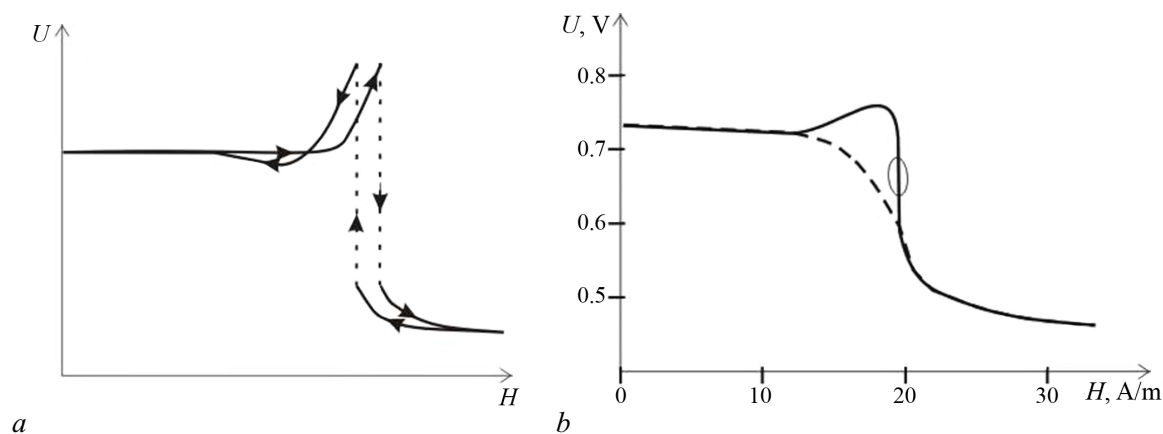


Рисунок. Амплитуда напряжения на LC -контуре с сердечником из аморфного ферромагнитного сплава при автопараметрическом резонансе в зависимости от внешнего магнитного поля H : a — при сильном возбуждении, b — при слабом возбуждении

Figure. Voltage amplitude across the LC -circuit with an amorphous ferromagnetic alloy core at autoparametric resonance depending on the external magnetic field H : a — with strong arousal, b — with weak arousal

связи, охватывающей аморфный ферромагнитный сердечник. При этом постоянное магнитное поле смещения непрерывно поддерживается путем сравнения его с соответствующим напряжением прецизионного источника опорного напряжения. Захват рабочей точки на зависимости «амплитуда напряжения – магнитная индукция» осуществляется кратковременным отключением источника питания отрицательной полярности операционного усилителя, осуществляющего пропорционально-интегрирующее регулирование тока в катушке обратной связи. В результате этого захват области рабочей точки всегда происходит с одной стороны резонансной кривой. Принципиальная электрическая схема одного из вариантов магнитомодуляционного преобразователя опубликована в [7].

Экспериментальная зависимость, показанная на рис. b , была получена на сердечнике в виде ленты аморфного ферромагнитного сплава базового состава $Fe_5Co_{70}Si_{15}B_{10}$ с размерами $35 \times 0.6 \times 0.02$ мм. Катушка колебательного LC -контурa содержала около 600 витков медного провода диаметром 0.071 мм. Частота возбуждения LC -контурa равнялась 256 кГц, а амплитуда тока возбуждения — менее 0.45 мА. Коэффициент преобразования магнитомодуляционного датчика с LC -контуром в рабочей области, отмеченной на рис. b овалом, может быть установлен в пределах от 1 мкВ/нТл до 10 мВ/нТл. При этом мощность возбуждения LC -контурa при наибольшей чувствительности не превышает 0.3 мВт. Если после детектирования высокочастотного напряжения на LC -контуре коэффициент преобразования будет составлять всего 1 мВ/нТл, то при применении на входе электрической схемы операционного усилителя ОР-27, имеющего входной шум 3 нВ/Гц^{1/2} в диапазоне частот от 10 Гц и выше, в магнитомодуляционном датчике с автопараметрическим усилением можно получить разрешение по магнитному полю около 0.03 пТл/Гц^{1/2}.

Порог чувствительности датчика зависит от собственного магнитного шума аморфного ферромагнитного сердечника и шумов активных и пассивных элементов электронной схемы. Тепловым шумом катушки индуктивности LC -контурa можно пренебречь, так как ее активное сопротивление составляет всего около 20 Ом. Как следует из опыта работы с индукционными датчиками, собственный магнитный шум ферромагнитных сердечников в пассивном состоянии в слабом магнитном поле достаточно мал [1]. В активных датчиках на основе ферромагнитных сердечников потеря энергии при их возбуждении состоит из потерь на вихревые токи и потерь на перемагничивание, которые характеризуются площадью петли гистерезиса. В аморфных ферромаг-

нетиках потерь на вихревые токи практически нет. Это следует как из их относительно высокого удельного электрического сопротивления, так и из геометрии сердечника в виде узкой тонкой полоски аморфного ферромагнитного сплава. Что касается магнитомодуляционных датчиков с автопараметрическим усилением на основе аморфных сплавов с компенсированной продольной магнитострикцией, то, в отличие от феррозондов, их возбуждение осуществляется слабым магнитным полем высокой частоты по частной петле, занимающей ничтожно малую часть полной петли гистерезиса. Кроме того, значительная часть энергии высокочастотного перемагничивания сердечника по частной петле не является безвозвратно потерянной, а при автопараметрическом резонансе возвращается в энергию колебательного LC -контура в виде энергии четных гармоник, возникающих в результате магнитоупругого взаимодействия. Поэтому реальные потери энергии и случайный магнитный шум при высокочастотном перемагничивании аморфных ферромагнетиков в области автопараметрического резонанса могут быть значительно меньше.

Расчетная магнитная проницаемость формы сердечника из примененного аморфного ферромагнитного сплава с компенсированной продольной магнитострикцией примерно равна 18600. Так как магнитная проницаемость материала сердечника из данного аморфного ферромагнитного сплава близка к 500000, то магнитная проницаемость собственно сердечника оказывается равной 18000. Как следует из рис. *b*, напряженность внешнего магнитного поля в рабочей точке, соответствующей области максимальной крутизны резонанса, $H = 20$ А/м. В таком случае магнитная индукция в аморфном ферромагнитном сердечнике в области рабочей точки равна 0.36 Тл. Это значение достаточно близко к индукции насыщения данного аморфного ферромагнитного сплава, $B_s = 0.43$ Тл. То есть аморфный ферромагнитный сердечник во время работы постоянно находится в полунасыщенном состоянии, что способствует снижению собственного магнитного шума, вызываемого процессом перемагничивания и тепловыми флуктуациями намагниченности.

Заключение

1. *Чувствительность датчика.* Использование участка нелинейной зависимости «магнитная индукция — напряжение в колебательной LC -контуре с аморфным ферромагнитным сердечником» в области максимальной крутизны характеристики автопараметрического резонанса позволяет получить в магнитомодуляционном датчике с аморфным ферромагнитным сердечником коэффициент преобразования, достигающий 10 мВ/нТл.
2. *Порог чувствительности датчика.* Возбуждение колебательного LC -контура с аморфным ферромагнитным сердечником слабым гармоническим магнитным полем высокой частоты и смещение рабочей точки аморфного ферромагнитного сердечника в область его технического насыщения обеспечивает низкий уровень собственных шумов.
3. *Сфера применения датчика.* Магнитомодуляционные датчики с автопараметрическим усилением сигнала магнитной индукции могут найти применение в различных областях науки и техники при измерении слабого переменного магнитного поля низких частот.

Список литературы

1. Поляков С. В., Резников Б. И., Щенников А. В., Копытенко Е. А., Самсонов Б. В. Линейка индукционных датчиков магнитного поля для геофизических исследований // Сейсмические приборы. 2016. Т. 52, № 1. С. 5–27.
2. Janosek M., Butta M., Dressler M., Saunderson E., Novotny D., Fourie C. 1-pT noise fluxgate magnetometer for geomagnetic measurements and unshielded magnetocardiography // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2020. Vol. 69, no. 5. P. 2552–2560. DOI: 10.1109/TIM.2019.2949205.

3. *Fescenko I., Jarmola A., Savukov I., Kehayias P., Smits J., Damron J., Ristoff N., Mosavian N., Acosta V.M.* Diamond magnetometer enhanced by ferrite flux concentrators // *Physical Review Research*. 2020. Vol. 2, no. 2. P. 023394. DOI: 10.1103/PhysRevResearch.2.023394.
4. *Yang K., Chen H., Lu L., Kong X., Yang R., Wang J.* SQUID array with optimal compensating configuration for magnetocardiography measurement in different environments // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2019. Vol. 29, no. 6. P. 1600707. DOI: 10.1109/TASC.2019.2904483.
5. *Faley M.I., Maslennikov Y.V., Koshelets V.P., Dunin-Borkowski R.E.* Flip-chip high-Tc dc SQUID magnetometer with a ferromagnetic flux antenna // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2018. Vol. 28, no. 4. P. 1600505. DOI: 10.1109/TASC.2018.2791414.
6. *Сокол-Кутыловский О.Л.* О влиянии механического напряжения на ленты аморфных ферромагнитных сплавов // *Деп. ВИНТИ*. 2002. № 1338-B2002. 9 с.
7. *Sokol-Kutylovskii O.L.* A magneto-modulating meter of a weak variable magnetic field // *Instruments and Experimental Techniques*. 2019. Vol. 62, no. 4. P. 554–557. DOI: 10.1134/S0020441219040110.

References

1. Poliakov SV, Reznikov BI, Shchennikov AV, Kopytenko EA, Samsonov BV. The range of induction-coil magnetic field sensors for geophysical explorations. *Seismic Instruments*. 2016; 52(1):5–27 (in Russian).
2. Janosek M, Butta M, Dressler M, Saunderson E, Novotny D, Fourie C. 1-pT noise fluxgate magnetometer for geomagnetic measurements and unshielded magnetocardiography. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2020;69(5):2552–2560. DOI: 10.1109/TIM.2019.2949205.
3. Fescenko I, Jarmola A, Savukov I, Kehayias P, Smits J, Damron J, Ristoff N, Mosavian N, Acosta VM. Diamond magnetometer enhanced by ferrite flux concentrators. *Physical Review Research*. 2020;2(2):023394. DOI: 10.1103/PhysRevResearch.2.023394.
4. Yang K, Chen H, Lu L, Kong X, Yang R, Wang J. SQUID array with optimal compensating configuration for magnetocardiography measurement in different environments. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2019;29(6):1600707. DOI: 10.1109/TASC.2019.2904483.
5. Faley MI, Maslennikov YV, Koshelets VP, Dunin-Borkowski RE. Flip-chip high-Tc dc SQUID magnetometer with a ferromagnetic flux antenna. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2018;28(4):1600505. DOI: 10.1109/TASC.2018.2791414.
6. Sokol-Kutylovskii OL. On the effect of mechanical stress on strips of amorphous ferromagnetic alloys. *Dep. VINITI*. 2002. No. 1338-B2002. 9 p. (in Russian).
7. Sokol-Kutylovskii OL. A magneto-modulating meter of a weak variable magnetic field. *Instruments and Experimental Techniques*. 2019;62(4):554–557. DOI: 10.1134/S0020441219040110.



Сокол-Кутыловский Олег Леонидович — родился в 1952 году. Окончил Кубанский государственный университет (1978). Доктор технических наук (1998). Работает в Институте геофизики имени Ю.П. Булашевича Уральского отделения РАН в должности старшего научного сотрудника. Научные интересы: физика магнитных явлений.

Россия, 620016 Екатеринбург, ул. Амундсена, 100
 Институт геофизики имени Ю.П. Булашевича Уральского отделения РАН
 E-mail: s-k52@mail.ru
 ORCID: 0000-0003-1221-7322
 AuthorID: 28781