

ИНТЕГРИРУЮЩИЕ УСТРОЙСТВА В ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТРАКТАХ ИНДУКЦИОННЫХ МАГНИТОМЕТРОВ И АНАЛИЗ ИХ ПОГРЕШНОСТИ ИНТЕГРИРОВАНИЯ

Кулигин Михаил Николаевич

кандидат физико-математических наук, доцент;
доцент кафедры «Управление и контроль в технических средствах» Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых»
E-mail: kuliginmn2012@yandex.ru.

Адрес: 602264, г. Муром, ул. Орловская, 23.

Аннотация: В работе представлена оригинальная структура построения интегрирующих устройств, приводящая к повышению точности интегрирования в диапазоне сверхнизких частот (0,002–3 Гц). Показана возможность практической схемной реализации подобных интегрирующих устройств на основе операционного усилителя (приведены схемы и их расчёт). Рассмотрены практические схемы интеграторов второго порядка и их передаточные функции. Приведены результаты вычислений, показывающие увеличение точности интегрирования интегратора второго порядка по отношению к интегратору первого порядка в зависимости от частоты.

Ключевые слова: интегратор второго порядка, передаточная функция, точность интегрирования, индукционный магнитометр, операционный усилитель, коэффициенты аппроксимации.

Введение

Особым видом изменения геомагнитного поля Земли являются так называемые геомагнитные пульсации – электромагнитные волны очень низкой частоты (0,002–3 Гц), наблюдающиеся на поверхности Земли. Геомагнитные пульсации порождаются за счёт взаимодействия плазмы гидромагнитных волн, идущих от Солнца, с магнитосферой Земли. В системах регистрации геомагнитных пульсаций аналоговый тракт предварительного усиления и фильтрации магнитной компоненты электромагнитного поля Земли назван магнитометром [1, 2, 6].

Измерительный тракт магнитометра должен иметь стабильную плоскую амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) при расширении полосы пропускания до 0,002 Гц с минимальным уровнем собственных шумов и температурной нестабильности. Для достижения поставленных целей индукционный датчик конструктивно выполняется совместно с предусилителем (активный датчик) и подключается к

тракту фильтрации и управления магнитометра через линию связи. Индукционный датчик содержит катушку индуктивности датчика L_g с большим (сотни тысяч) числом витков W_g и катушку связи (калибровки) L_c с меньшим (тысячи) числом витков W_c . (см. рис. 1). Катушки образуют низкодобротный (с учетом активных сопротивлений обмоток и паразитных емкостей) трансформатор с ферромагнитным сердечником, что допускает анализ схемы с использованием схемы замещения трансформатора [2, 3, 8]. Для плоской коррекции АЧХ магнитометра и расширения его по-

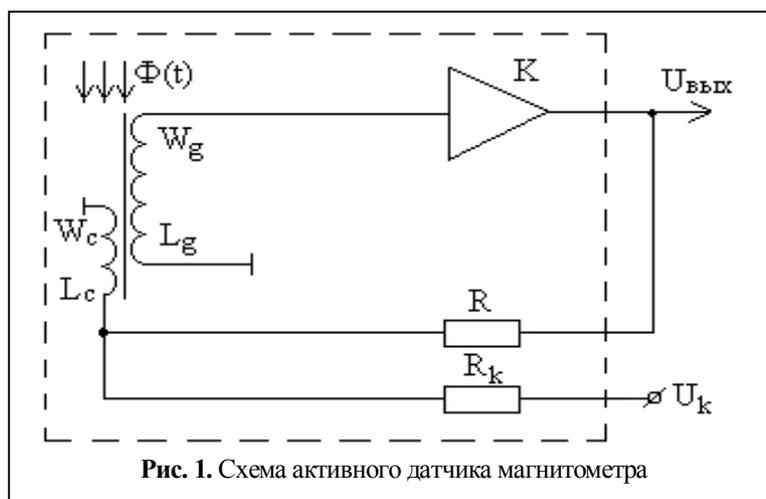


Рис. 1. Схема активного датчика магнитометра

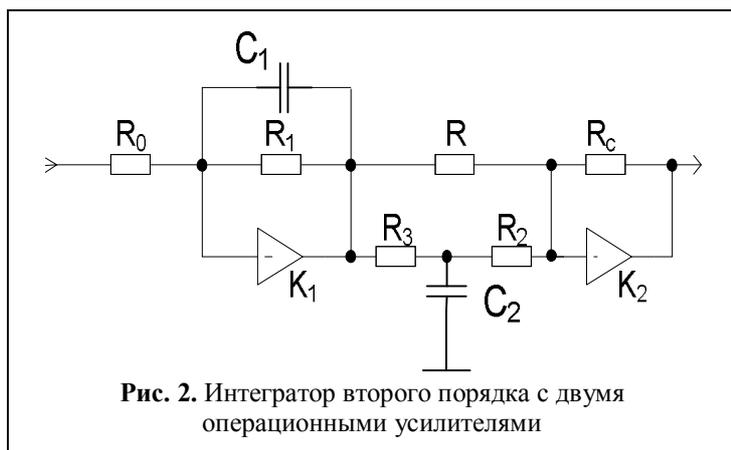


Рис. 2. Интегратор второго порядка с двумя операционными усилителями

лосы пропускания в область сверхнизких частот в тракт фильтрации включают интегрирующие устройства второго порядка с умножением постоянной времени интегрирования [6, 8]. Их назначение – повысить точность интегрирования в диапазоне сверхнизких частот.

Индукционный магнитометр в своей базовой модели состоит из индукционного датчика и предусилителя, а также последующего тракта фильтрации и управления [8]. Схема основной части (датчик с предусилителем К – активный датчик) приведена на рис. 1.

В работе [4] на базе обобщённых структурных схем интегрирующих устройств математически доказано, что погрешность интегрирования можно уменьшить, увеличив порядок (число интегрирующих звеньев) интегрирующих устройств. Там же представлена оригинальная структура построения интегрирующих устройств, приводящая к повышению точности интегрирования в диапазоне сверхнизких частот. Эта оригинальная структура построения интегрирующих устройств подтверждена авторскими свидетельствами [9, 10], в описании которых подробно изложена методика определения их погрешности.

Цель данной работы – продемонстрировать конкретные схемы активных интегрирующих устройств (интеграторов), позволяющие повысить точность интегрирования электрических сигналов в диапазоне сверхнизких частот. Выбор схем, представленных далее в статье, обусловлен их многократным применением в системах сбора и регистрации геофизических

данных, разработанных на кафедре электроники и вычислительной техники МИ ВлГУ совместно с ИФЗ РАН.

Активные интегрирующие устройства

Использование операционных усилителей позволяет упростить структуру схем интеграторов. На рис. 2 изображена схема интегратора второго порядка с двумя операционными усилителями (ОУ), причём первый входит в интегрирующий усилитель, а второй – в сумматор. Элементы схемы, относящиеся к первому операционному усилителю – K_1 (R_0 , R_1 и C_1), образуют классический интегратор первого порядка, наиболее часто используемого на практике с целью интегрирования сигналов. Масштабные резисторы R_0 и R_1 (отношение R_1 к R_0) определяют коэффициент передачи интегратора на постоянном токе, ёмкость интегрирующего конденсатора C_1 совместно с номиналами резисторов R_1 , R_0 определяют эквивалентную постоянную времени интегрирования классического интегратора первого порядка. При попытке использования такой схемы для интегрирования сигналов низкочастотного диапазона (единицы и доли герц) и получения приемлемой точности интегрирования, равной, например, 3%, необходимо постоянную времени интегрирования увеличить на порядок по сравнению с расчётной. Временная стабильность её параметров будет крайне низкой.

Далее рассмотрены практические схемы интеграторов второго порядка, структура построения которых соответствует рекомендациям, изложенным в работе [1].

Передаточная функция интегратора на рис. 2 аналогична функции схемы рис. 2 из [1]:

$$K(p) = K_0 \frac{1 + R(R_2 + R_3) + p\tau_2}{(1 + p\tau_1)(1 + p\tau_2)}, \quad (1)$$

где $\tau_1 = C_1 R_1$ – постоянная времени первого звена интегрирования; $\tau_2 = C_2 R_2 \parallel R_3$ – посто-

янная времени второго звена интегрирования;

$$K_0 = \frac{R_1 R_c}{R_0 R} - \text{масштабный коэффициент.}$$

Схему интегратора рис. 2 можно преобразовать таким образом, что функцию сумматора будет выполнять первый усилитель (см. рис. 3); в этом случае второе интегрирующее звено этой схемы (элементы R_2, R_3, C_2) оказывается включённым между входом и выходом первого ОУ (на рис. 3 эти элементы обозначены g_3, g_4, c_2).

Схема интегратора второго порядка с одним операционным усилителем приведена на рис. 3. На этом рисунке в целях упрощения расчётных соотношений $R_i = 1/g_i$.

На ОУ реализован интегратор второго порядка, позволяющий повысить точность интегрирования в диапазоне сверхнизких частот. Устройство выполняет операцию двойного интегрирования сигнала (интегрирующие ёмкости C_1 и C_2) с суммированием результата интегрирования на входе ОУ. Схема на рис. 3 представляет собой интегрирующее устройство второго порядка с передаточной функцией:

$$K(p) = K_0 \frac{1}{pa_1} \cdot \frac{pa_1 + p^2 a_2}{1 + pb_1 + p^2 b_2}, \quad (2)$$

где $K_0 = g_1(g_3 + g_4)/A$ – масштабный коэффициент; $A = g_3 \cdot g_4 + g_2(g_3 + g_4)$ – дополнительный коэффициент для сокращения записи; коэффициенты аппроксимации полиномов:

$a_1 = C_1(g_3 + g_4)/A$ – из условия равенства старших коэффициентов $a_2 = b_2$;

$$a_2 = a_1 c_2 (g_3 + g_4);$$

$$b_1 = [c_1(g_3 + g_4) + c_2 g_2]/A; \quad b_2 = C_1 C_2 / A.$$

Для приближения реального интегрирования к идеальному необходимо обеспечить постоянство передачи передаточной функции (2) в более широком диапазоне частот. Поэтому требуется выполнить условие плоской коррекции АЧХ (коррекции по Брауде) [9, 11], которое определяется из соотношения между ко-

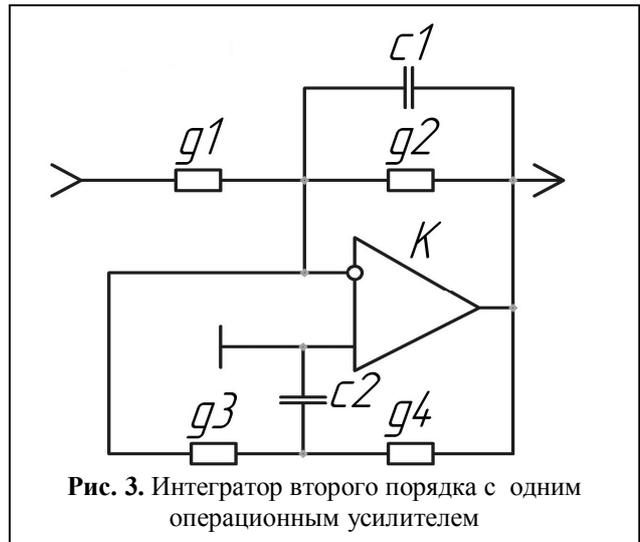


Рис. 3. Интегратор второго порядка с одним операционным усилителем

эффициентами полиномов: $a_1^2 = b_1^2 - 2b_2$, $a_2^2 = b_2^2$ и с учётом значений коэффициентов разрешается в форме отношений элементов схемы $\frac{C_1}{C_2} = \frac{g_2^2}{2g_3 g_4} = \frac{R_3 R_4}{2R_2^2}$.

Таким образом, устройство на рис. 3 характеризуется передаточной функцией, коэффициенты полиномов которой удовлетворяют условиям получения плоской АЧХ, причём частотные свойства не зависят от масштабного резистора R_1 .

В частности, при условии $g_2 = g_3 = g_4 = g$ получим $C_2 = 2C_1$ и передаточную функцию в виде:

$$K(p) = K_0 \frac{g_1}{g} \cdot \frac{1}{p\tau} \cdot \frac{\frac{2}{3}(p\tau + p^2\tau^2)}{1 + \frac{4}{3}p\tau + \frac{2}{3}p^2\tau^2}, \quad (3)$$

где $\tau = C_1/g$.

В таблице 1 приведены величины погрешности интегрирования $\Delta = 1 - K(x)$ для интегратора первого Δ_1 и второго Δ_2 порядков в зависимости от нормированной частоты $x = \omega\tau$ при величине коэффициентов аппроксимации $a_1 = a_2 = b_2 = 1$ и $b_1 = \sqrt{3}$, где $K(x)$ – модуль отношения полиномов последнего множителя нормированной функции (3).

Как следует из таблицы 1, погрешность интегрирующего устройства даже второго поряд-

Таблица 1. Расчётные значения погрешности интегрирования Δ для интегратора первого Δ_1 и второго Δ_2 порядков в зависимости от частоты X

X	2	3	4	8	16
$\Delta_1, \%$	10,5	5,1	3	0,77	0,2
$\Delta_2, \%$	2,4	0,55	0,18	0,012	0,00075
Δ_1/Δ_2	4,4	9,4	16	64	266

ка сравнительно с интегратором первого порядка существенно меньше по абсолютной величине (выигрыш в десятки и сотни раз при соответствующей погрешности в десятые и сотые доли процента). Интегратор, реализованный по такой схеме, имеет расширенный в области низких частот диапазон (примерно 1,5 октавы при погрешности в 0,5%) и, кроме того, уменьшение частотной погрешности происходит со скоростью 24 дБ/октаву против 12 дБ/октаву однозвенного интегрирующего устройства.

Аналогично определяются соотношения элементов схемы интегрирующих устройств 3-го и более высоких порядков, обеспечивающих требуемую точность интегрирования на заданной частоте.

Для обеспечения точности интегрирования 1%, например, на частоте 0,001 Гц требуется большая постоянная времени интегрирования. Реализация такой постоянной времени путем увеличения номиналов конденсаторов и резисторов приводит к уменьшению стабильности параметров устройства. Далее предлагается



Рис. 4. Интегратор второго порядка с умножением постоянной времени интегрирования

схема интегратора второго порядка, где увеличение постоянной времени интегрирования (её умножение) осуществляется с помощью ОУ.

На рис. 4 приведена схема интегрирующего устройства, в которой достигается умножение постоянной времени при одновременной реализации интегрирующей передаточной функции второго порядка:

$$K(p) = \frac{K_0}{A} \cdot \frac{1}{pa_1} \cdot \frac{pa_1 + p^2 a_2}{1 + pb_1 + p^2 b_2}, \quad (4)$$

где $A = 1 - \beta_0 / (K_0 + 1)$ – глубина положительной обратной связи (ОС); β_0 – ослабление аттенюатора; $K_0 = g/g_1$ – усиление по постоянному напряжению при разомкнутой петле положительной ОС;

$$\tau = \frac{C_1}{g_1}; \quad a_1 = \frac{\tau}{A}; \quad \tau_1 = \frac{C_2}{g_2}; \quad a_2 = b_2 = \tau_1 \cdot a_1;$$

$$b_1 = \frac{[\tau_1 + \tau(1 - \beta_0)]}{A}.$$

Задавшись умножением ёмкости в A раз и усилением K_0 , можно определить $\beta_0 = (1 - A) / (1 + K_0)$ и найти отношение постоянных времени интегрирования τ_1 / τ , отвечающих условию оптимального интегрирования для рассмотренной схемы интегратора.

Активный интегратор лестничного типа

В этом разделе приведены расчётные соотношения для схемы интегратора (рис. 5) с лестничной схемой [1] в цепи обратной связи ОУ.

Передаточная функция схемы:

$$K(p) = K_0 \frac{1}{pC_1} \cdot \frac{(pC_1)m + (pC_1)^2 a_2 m}{1 + (pC_1)b_1 + (pC_1)^2 b_2}, \quad (5)$$

где коэффициенты полиномов:

$$a_2 = \frac{\alpha R_1}{1 + \frac{R_1}{R_2} + \frac{R_3}{R_2}}; \quad b_1 = R_c \left[1 + \frac{\alpha \left(1 + \frac{R_1}{R_c} \right)}{\left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right)} \right];$$

$$b_2 = \frac{\alpha R_c R_1}{1 + \frac{R_1}{R_2}};$$

дополнительные коэффициенты для сокращения записи:

$$\alpha = \frac{C_2}{C_1}; \quad K_0 = \frac{R_c}{R_1 + R_2} + \frac{R_c}{R_3};$$

m – нормирующий множитель.

Условия оптимальной плоской коррекции (коррекции по Брауде) [9] определяются из соотношения между коэффициентами полиномов:

$$a_1^2 = b_1^2 - 2b_2; \quad a_2^2 = b_2^2.$$

Значение множителя m определяется из второго условия, откуда:

$$m = R_c \left[1 + \frac{\frac{R_3}{R_2}}{1 + \frac{R_1}{R_2}} \right].$$

Первое условие плоской коррекции ($b_1^2 - 2b_2 - a_1^2 = 0$) с учётом m соответствует уравнению:

$$\left(1 + \frac{R_1}{R_c} \right)^2 \alpha^2 + 2\alpha \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) - \left[\left(\frac{R_3}{2} \right)^2 + 2 \frac{R_3}{R_2} \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) \right] = 0$$

Откуда решение для $\left(1 + \frac{R_1}{R_c} \right)$ таково:

$$\left(1 + \frac{R_1}{R_c} \right)^2 = 1 +$$

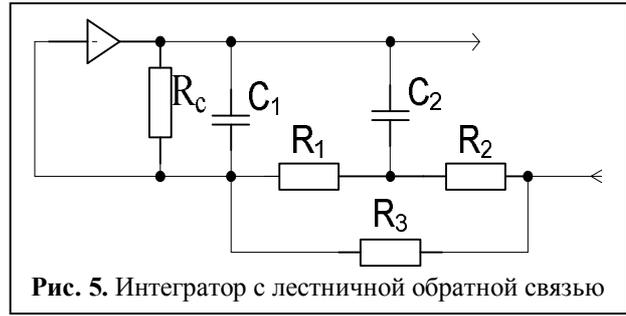


Рис. 5. Интегратор с лестничной обратной связью

$$+ \frac{\left[\left(\frac{R_3}{2} \right)^2 + 2 \frac{R_3}{R_2} \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) - \alpha^2 - 2\alpha \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) \right]}{\alpha^2}.$$

И оно разрешимо при условии $\frac{R_3}{R_2} > \alpha$.

Таким образом, задавая отношения $\frac{R_1}{R_2}, \frac{R_3}{R_2}, \frac{C_2}{C_1}$ (причем $\frac{C_2}{C_1} < \frac{R_3}{R_2}$) можно вычислить отношение $\frac{R_1}{R_c}$ из первого решения.

Или, задавая отношения $\frac{R_1}{R_2}, \frac{R_3}{R_2}, \frac{R_1}{R_c}$, можно определить отношение $\frac{C_2}{C_1}$, соответствующие

условиям оптимального интегрирования для рассмотренной схемы интегратора на рис. 5.

Заключение

Схемы интеграторов и расчётные соотношения, полученные в данной работе, можно использовать при построении реальных схем интегрирующих устройств, а также при разработке аналогичных устройств (модификаций): активных фильтров диапазона сверхнизких частот, линий задержки электрических сигналов, в системах автоматического управления. Приведены расчёты, показывающие, что погрешность разработанных схем интегрирующих устройств даже второго порядка существенно меньше по абсолютной величине сравнительно с интегратором первого порядка (выигрыш в десятки и сотни раз при соответствующей погрешности в десятые и сотые доли процента).

Литература

1. Troitskaya V.A., Chetaiev D.N., Morghounov V.A. et. al. On the structure of geomagnetic pulsations field // Program and Abstracts for the XVI IUGG General Assembly. Grenoble, 1975. P. 233.

2. Анисимов С.В., Дмитриев Э.М., Анисимова Е.Б., Бокастов С.С. Информационно-измерительный комплекс Геофизической обсерватории "Борок" // Вестник ОГТГН РАН. 2000. URL: http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dgggms/4-2000/anisimov.html (дата обращения 3.09.2018).

3. Иванов А.П. Аппаратура, автоматизация измерений и интерпретации дипольных электромагнитных зондирований земной коры : дисс. ... докт. техн. наук. М. : ИФЗ АН СССР, 1986.

4. Кулигин М.Н. Уменьшение погрешности интегрирующего устройства в диапазоне сверхнизких частот // Измерительная техника. 2017. № 1. С. 37–39.

5. 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.

6. Кузичкин О.П. Методы и устройства обработки информации в системе мониторинга импульсных геомагнитных источников. М. : САЙНС-ПРЕСС, 2008. 168 с.

7. Бельский А.М. Анализ составляющих инструментальной погрешности компенсационного магнитометра // Проблемы и достижения в науке и технике. Сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции. № 2. Омск. 2015. 168 с.

8. Крылов С.М. Индукционный магнитометр в системе обработки данных в реальном масштабе времени // Микро-ЭВМ в геомагнитных исследованиях. 1984. С. 21–43.

9. Пикалкин Ю.В., Кулигин М.Н., Струев А.И., Лепендин В.П. Интегрирующее устройство : авт. свид. СССР. № 1195362 ; заявл. 08.02.84, опубл. 30.11.85. Бюл. № 44.

10. Пикалкин Ю.В., Белокрыс С.П., Кулигин М.Н., Струев А.И., Матвейчев М.В. Интегрирующее устройство : авт. свид. СССР. № 1239731 ; заявл. 23.04.84, опубл. 23.06.86. Бюл. № 23.

11. Хейнлейн В.Е., Холмс В.Х. Активные фильтры для интегральных схем. М. : Связь, 1980. 656 с.

Поступила 3 сентября 2018 г.

English

INTEGRATING DEVICES IN THE INDUCTION MAGNETOMETER MEASURING PATHS AND THEIR INTEGRATION ERROR ANALYSIS

Mikhail Nikolayevich Kuligin – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Department of Control and Monitoring in Engineering Systems, Murom Institute (Branch) «Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs».

E-mail: kuliginmn2012@yandex.ru.

Address: 602264, Murom, Orlovskaya St., 23.

Abstract: The present system of recording and processing the Earth geomagnetic signals is a sophisticated hardware-software device package. This is primarily due to the abundance and inconsistency of the requirements that it should meet. The equipment operating frequency range (from 0.002...3 Hz) for research purposes should consider the unevenness of the amplitude spectrum (from 40...60 DB) and the spectrum width of certain recorded pulsations. The analog path of pre-amplification and the electromagnetic field magnetic component filtration in the geomagnetic pulsation recording systems of the Earth's electromagnetic field in the ultra-low frequency range is called a magnetometer. The magnetometer measuring path should have a stable flat gain response with the bandwidth widening up to 0.002 Hz with minimum levels of the internal noise and temperature instability. The second-order active integrators with the multiplying integrating time constant are enclosed into the magnetometer's filtration path for the flat correction of the amplitude-frequency response and the bandwidth widening in the ultra-low frequency range. Their role is to improve the integration accuracy in the ultra-low frequency range. The paper presents specific (implemented in magnetometers and active filters) diagrams of active integrating devices (integrators), enabling to improve the electrical signal integration accuracy in the ultra-low frequency range. These integrating devices perform the signal double integration operation with the integration effect summation in the OP AMP input. The description of these diagrams and the necessary design ratios that enable to calculate the resistors and capacitors rating of integrators' integrating circuits are given. It is demonstrated that the classical diagram of the active integrating device does not ensure the required integration accuracy in the ultra-low frequency range. Each diagram contains description of their transfer functions. It is required to ensure the continuity of the transfer function transfer ratio in a wider frequency range in order to approach the real integration to the ideal one. It means to fulfill the stipulation for the flat correction of the amplitude-frequency response (Braude correction), which is defined through the ratio between the polynomial coefficients of the transfer function poly-

mials of the developed device. Even the second-order integrating device error is significantly less in absolute value compared with the first-order integrator (the gain is tens and hundreds of times more with the relevant error in tenths and hundredths of a percent) according to this paper results. The integrator implemented according to this diagram has the extended low frequency range (about 1.5 octave with 0.5% error), and besides, the frequency error reduction occurs at speed of 24 dB/octave against 12 dB/octave of a single-section integrating device.

Keywords: second-order integrator, transfer function, integration accuracy, induction magnetometer, operational amplifier, approximation coefficients.

References

1. *Troitskaya V.A., Chetaiev D.N., Morghounov V.A.* et. al. On the structure of geomagnetic pulsations field // Program and Abstracts for the XVI IUGG General Assembly. Grenoble, 1975. P. 233.
2. *Anisimov S.V., Dmitriev E.M., Anisimova E.B., Bakastov S.S.* Data measuring system of "Borok" Geophysical Observatory // *Vestnik OGGGGN RAS*". 2000. URL: http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dgggms/4-2000/anisimov.htm (accessed 3.09.2018).
3. *Ivanov A.P.* Equipment, measurement automation and interpretation of dipole electromagnetic probing of the Earth's crust : Doct. Thes. Moscow : IFZ AS SSSR, 1986.
4. *Kuligin M.N.* Integrating device error reduction in the ultra-low frequency range // *Izmeritel'naya tekhnika*. 2017. No. 1. Pp. 37–39.
5. *Polyakov S.V., Reznikov B.I., Schennikov A.V., Kopytenko E.A., Samsonov B.V.* The line-up of magnetic field induction sensors for geophysical surveys // *Seysmicheskiye pribory*. 2016. Vol. 52, No.1. Pp. 5–27.
6. *Kuzichkin O.R.* Data processing methods and devices in the monitoring system of pulsed geomagnetic sources. M. : Science Press, 2008. 168 p.
7. *Belsky A.M.* Instrumentation error constituents' analysis of the compensation magnetometer // *Problems and achievements in science and technology. Collection of scientific papers on the results of the International Applied Science Conference*. No. 2. Omsk, 2015. 168 p.
8. *Krylov S.M.* Induction magnetometer in the real time data processing system. *Micro-computers in geomagnetic research*. ed. by E.N. Fedorov. Moscow : Nauka, 1984. Pp. 21–43.
9. *Pikalkin Yu.V., Kuligin M.N., Struev A.I., Lependin V.P.* Integrating device : Inv. sert. USSR. No. 1195362 ; decl. 08.02.84, publ. 30.11.85. Bul. No. 44.
10. *Pikalkin Yu.V., Belokrysov S.P., Kuligin M.N., Struev A.I., Matveichev M.V.* Integrating device : Inv. sert. USSR. No. 1239731 ; decl. 23.04.84, publ. 23.06.86. Bul. No. 23.
11. *Heinlein W.E., Holmes W.H.* Active filters for integrated circuits. Moscow : Svyaz, 1980. 656 p.