

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ СИСТЕМЫ КАЛИБРОВКИ МОБИЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ ИНДИКАЦИИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

Маркарян Н.Р.¹, Алексанян Г.К.¹, Кревченко Ю.Р.¹

¹ФГБОУ ВПО «Южно-Российский государственный технический университет (Новочеркасский политехнический институт)», Новочеркасск, Россия (346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132), e-mail: nikal-markaryan@mail.ru

В статье представлены результаты исследования магнитного поля (МП), создаваемого системой катушек Гельмгольца. Разработана функциональная схема мобильного устройства индикации и прогнозирования геомагнитных возмущений. Разработана структурная схема системы калибровки мобильных устройств индикации и прогнозирования геомагнитных возмущений, использующих магниточувствительный датчик, и описан принцип ее работы. Также представлены результаты моделирования трехкомпонентной системы катушек Гельмгольца для создания однородного магнитного поля и рассчитаны значения однородности МП вдоль осей пар катушек. Разработан алгоритм программы для определения оптимальной конструкции системы создания однородного МП для калибровки мобильных устройств индикации и прогнозирования геомагнитных возмущений. Построена кривая распределения магнитной индукции вдоль вектора-сенсора.

Ключевые слова: однородное магнитное поле, катушки Гельмгольца, магниточувствительный датчик, калибровка.

RESEARCH OF DEPENDENCE OF THE GEOMAGNETIC FIELD VECTOR PERIODIC COMPONENTS FROM THE GEOGRAPHIC COORDINATES OF THE OBSERVATION POINT

Markaryan N.R.¹, Aleksanyan G.K.¹, Krevchenko Y.R.¹

¹South Russian State Technical University (Novochoerkassk Polytechnic Institute), Novochoerkassk, Russia (346428, Novochoerkassk, street Prosveshenia, 132), e-mail: nikal-markaryan@mail.ru

The article presents the results of studies of magnetic field (MF), created by a system Helmholtz coils. Functional scheme of the mobile device display and prediction of geomagnetic disturbances was developed. Structural scheme of the system for mobile devices indicating and prediction of geomagnetic disturbances, using magnetometer sensing unit, calibration and describes how it works was developed. Also presented are the results of simulation of three-component system of Helmholtz coils for creation of uniform magnetic field and calculated values of the homogeneity of the MF along axes of pairs of coils. Developed the algorithm to determine the optimal design of the system to create a homogeneous MP for calibration mobile devices indicating and prediction of geomagnetic disturbances. Built curve distribution of the magnetic induction along the vector sensor.

Key words: the homogeneous magnetic field, Helmholtz coils, magnetometer sensing unit, calibration.

Введение

Изучение влияния геомагнитного поля (ГМП) на биологические и технические системы в настоящее время является одним из важных направлений развития современной науки [2]. Доказано, что во время ГМБ имеют место нарушения самочувствия человека, снижение качества связи, нарушение работоспособности технических средств, систем навигации космических аппаратов и другие негативные последствия [3]. Существует немало свидетельств воздействия ГМБ на технические системы и сооружения, особенно на протяженные электропроводящие системы, такие как линии электропередач и металлические нефте- и газопроводы. К тому же имеют место сообщения о потере искусственных спутников

Земли (ИСЗ) во время сильных магнитных бурь по причине сбоев в работе систем навигации и связи, а также о сходе ИСЗ с орбит и гибели в плотных слоях атмосферы. После некоторых особо сильных ГМБ возникали сильные природные аномалии, такие как извержения вулканов, землетрясения, ураганные ветры и тайфуны. В этой связи существует необходимость в разработке новых методов и устройств оценки геомагнитной активности [7].

Известно, что основное ГМП практически не влияет на жизнедеятельность человека. Негативное влияние оказывают непосредственно его возмущения [3]. Особое место среди геомагнитных возмущений занимают геомагнитные бури (ГБ). О наступлении ГБ можно судить по характерным изменениям значения вектора напряженности ГМП в начальный период ее наступления (фаза развития). Это значит, что существует возможность предварительного прогноза ГБ. Поэтому в [1] было предложено выделять эти возмущения с помощью математической модели, описывающей спокойные ГМП, что в дальнейшем позволит разработать метод прогноза ГБ.

Для реализации предложенного способа выделения возмущений разработано устройство, функциональная схема которого приведена на рисунке 1.

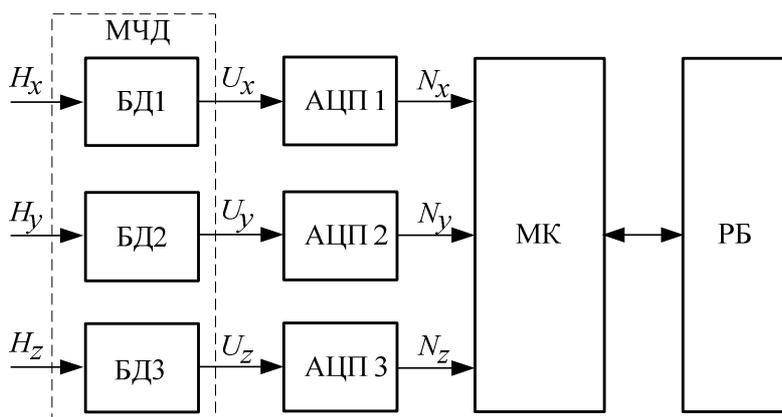


Рисунок 1 – Функциональная схема мобильного устройства индикации и прогнозирования геомагнитных возмущений

На рисунке 1 МЧД – магниточувствительный датчик, содержащий БД1 – БД3 – три блока датчиков, ориентированные взаимно ортогонально. При воздействии на блок МЧД ГМП, показанного на рисунке как H_x , H_y и H_z , на его выходе формируются соответственно напряжения U_x , U_y и U_z , пропорциональные величине воздействующего поля. С помощью АЦП они преобразуются в цифровые коды N_x , N_y и N_z и подаются на микроконтроллер МК для дальнейшей обработки и выполнения метода выделения возмущений и прогнозирования состояния ГМП в будущем. Полученные результаты предоставляются для наблюдения в регистрирующем блоке РБ.

Цель работы: создание алгоритма программы для определения оптимальной конструкции системы для создания однородного магнитного поля различных конфигураций для систем калибровки мобильных устройств индикации и прогнозирования геомагнитных возмущений.

Материал и методы исследования. Моделирование магнитного поля производилось в пакетах программ *Ansoft Maxwell 14.0* [6] и *FEMM 4.2* [8]. В качестве исходных данных использовались модели системы трех взаимно ортогональных пар катушек Гельмгольца (*Maxwell 14.0*) – для трехмерной модели, и пара катушек Гельмгольца – для двухмерной модели (*FEMM 4.2*).

Результаты и обсуждение

Для исследования мобильного устройства индикации и прогнозирования геомагнитных возмущений разработана информационно-измерительная система калибровки МЧД, структурная схема которого показана на рисунке 2 [5]. МЧД состоит из трех взаимно ортогональных блоков, чем обуславливаются требования объемности и ортогональности системы калибровки.

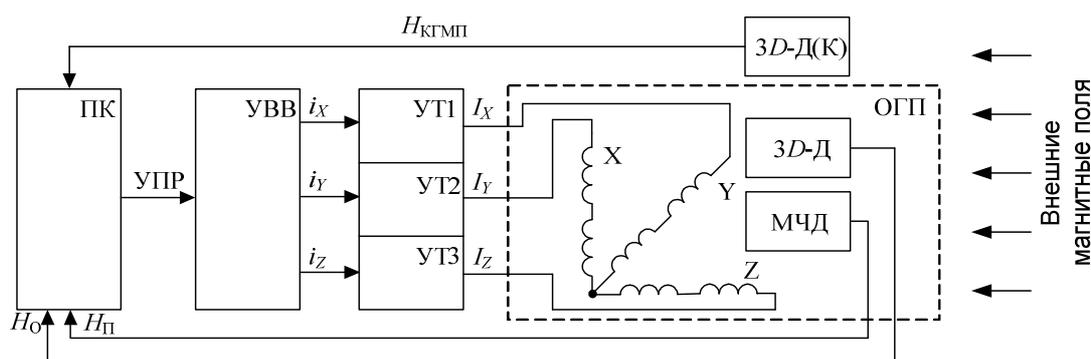


Рисунок 2 - Структурная схема системы калибровки МЧД

Схема работает следующим образом. Внешнее поле воздействует на трехкомпонентный датчик компенсации внешних магнитных помех (ВМП) 3D-Д(К). Полученный на его выходе сигнал $H_{КГМП}$ пропорционален ВМП и подается на персональный компьютер ПК, где обрабатывается и по управляющей шине УПР передается на устройство ввода-вывода УВВ. На выходе УВВ формируются управляющие токи i_x , i_y и i_z , которые после преобразования на усилителях тока УТ1 – УТ3 в I_x , I_y и I_z подаются на источник трехмерного магнитного поля ИТМП (систему катушек Гельмгольца X, Y, Z). В область генерируемого поля ОГП помещаются поверяемый датчик МЧД и образцовый датчик 3D-Д. Сигналы с поверяемого МЧД $H_{П}$ и с образцового 3D-Д H_0 подаются для обработки на ПК. Программное обеспечение, функционирующее на ПК, формирует управляющие сигналы так, чтобы токи, подаваемые на ИТМП, создавали такое магнитное поле, которое компенсировало бы ВМП. Процесс калибровки состоит из двух основных этапов: компенсация внешних магнитных полей и создание образцового магнитного поля. Первый этап заключается в управлении

величиной магнитной индукции B в области генерируемого поля посредством изменения тока I в катушках Гельмгольца таким образом, чтобы скомпенсировать ВМП (ГМП, а также поля, создаваемые окружающими техническими средствами). Второй этап заключается в установлении значений магнитной индукции в области измерения, соответствующих проверяемому показанию поверяемого МЧД, соответствующего делениям образцового 3D-Д. При достижении каждого значения магнитной индукции, фиксируемого по 3D-Д, на шкале МЧД выполняются соответствующие отметки [4].

Источник образцового трехмерного магнитного поля может быть создан с помощью системы катушек Гельмгольца. В пакете *Ansoft Maxwell 14.0* была смоделирована конструкция трех пар катушек Гельмгольца, приведенная на рисунке 3.

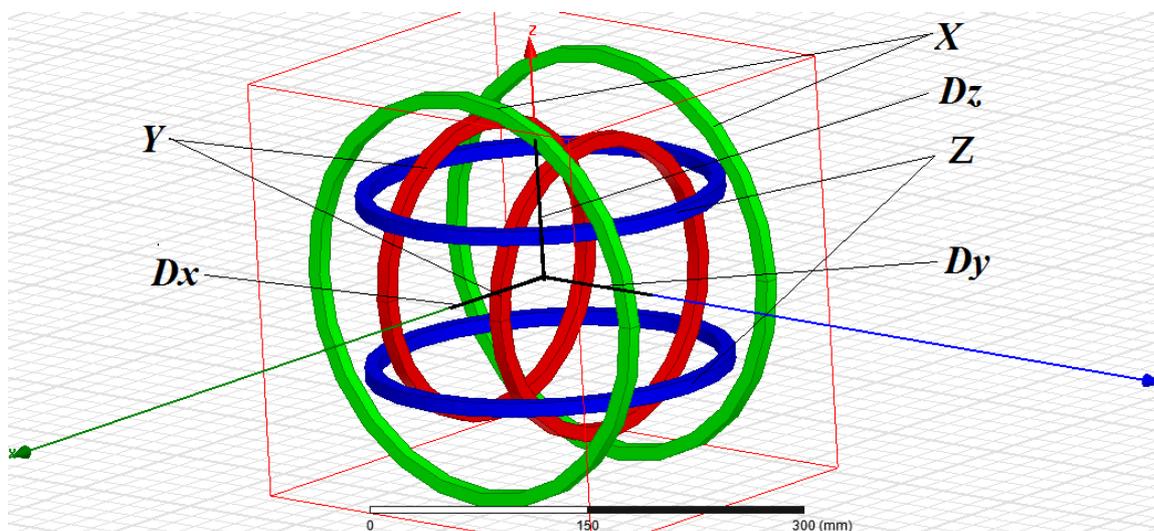


Рисунок 3 – Моделирование конструкции трех пар катушек Гельмгольца

Конструкция состоит из трех пар катушек – X, Y и Z, оси которых ортогонально направлены относительно друг друга, как показано на рисунке 3. Однородность Δ сгенерированного поля определяется согласно следующей формуле [9]:

$$\Delta, \% = \left| \frac{(B_0 - B_i)}{B_i} \cdot 100 \right|,$$

где B_0 - индукция магнитного поля в точке посередине между катушками на их оси, B_i - магнитная индукция в любой другой точке пространства, поле которого исследуется на однородность. Однородность выражается в процентах относительно поля в центре системы катушек. В таблице 1 приведены значения индукции магнитного поля B системы трех взаимно ортогональных пар катушек Гельмгольца в зависимости от расстояния от центра системы d вдоль контуров (Dx , Dy , Dz), лежащих вдоль осей модели, и рассчитанные значения однородности поля Δ .

Таблица 1 – Распределение магнитного поля вдоль осей системы катушек Гельмгольца

d , мм	Dx		Dy		Dz	
	B , нТл	Δ , %	B , нТл	Δ , %	B , нТл	Δ , %

0	33,56	0	33,56	0	33,56	0
7,1	33,54	0,04	33,56	0,01	33,54	0,05
14,3	33,49	0,19	33,55	0,02	33,45	0,31
21,4	33,39	0,48	33,53	0,06	33,29	0,80
28,6	33,25	0,93	33,50	0,15	33,05	1,52
35,7	33,05	1,54	33,49	0,18	32,74	2,47
42,9	32,80	2,31	33,17	1,16	32,36	3,67
50,0	32,22	4,15	31,76	5,66	31,91	5,15
57,1	31,08	7,97	30,59	9,70	30,80	8,93
64,3	29,05	15,53	29,54	13,57	28,90	16,12

Из таблицы видно, что существует возможность, задавшись предварительно значением однородности генерируемого поля Δ , выделить в пространстве тригонометрическую фигуру, внутри объема которой однородность поля не будет превышать заданного значения.

В связи с этим разработан алгоритм программы моделирования системы для создания однородного магнитного поля и определения ее конфигурации на основе упрощенной осесимметричной модели пары катушек Гельмгольца [8]. Она была построена в *FEMM 4.2*, и является взаимозаменяемой с системой, указанной выше, т.к. поле системы трех пар катушек является симметричной относительно трех осей соответственно. Алгоритм приведен на рисунке 4. Рассмотрим принцип его работы.

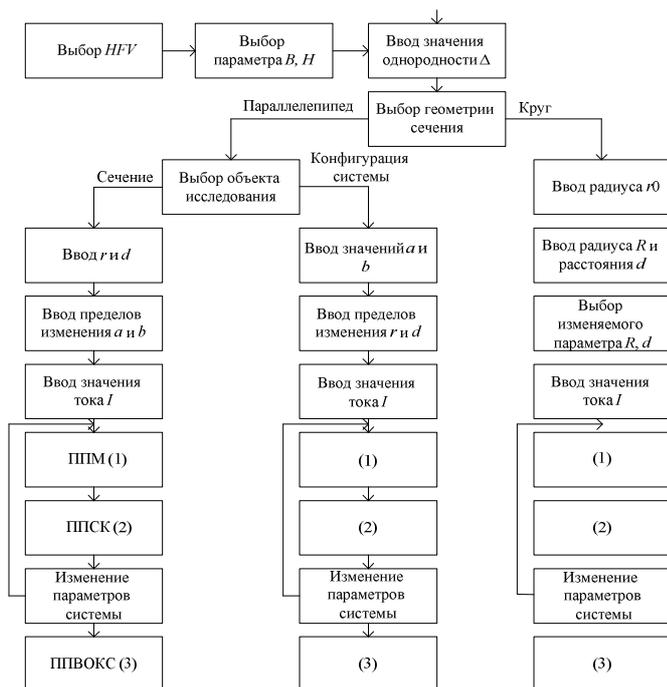


Рисунок 4 – Алгоритм программы определения оптимальной конструкции системы катушек Гельмгольца

На первом этапе производится выбор геометрической формы области однородного магнитного поля (*HFV*) (цилиндр или сфера), выбор наблюдаемого параметра B, H , ввод значения Однородности Δ , выбор геометрии сечения исследуемой системы: параллелепипед (квадрат, прямоугольник), круг. В том случае, если выбран параллелепипед, пользователю предлагается выбрать объект исследования: геометрия сечения катушек либо конфигурация

системы. В первом случае неизменными являются средний радиус катушек r и расстояние между центрами d . Во втором случае они изменяются в заданных пределах.

Если в качестве объекта исследования выбрана геометрия сечения катушек, пользователю предлагается ввести ряд исходных данных: радиус катушек Гельмгольца r и расстояние между их центрами d , пределы изменения длин сторон геометрии сечения a и b и значение тока в катушках I . Далее выполняется подпрограмма построения модели по заданным параметрам и расчет магнитного поля (ППМ) методом конечных элементов в среде *FEMM* 4.2. Затем запускается подпрограмма построения системы контуров и вписывания тригонометрической фигуры в область однородного поля (ППСК), работа которой описана ниже.

После этого выполняется изменение параметров системы в зависимости от входных данных и переход к ППМ до тех пор, пока не будут достигнуты пределы изменения a и b .

Затем производится сравнение объемов всех построенных ППСК тригонометрических фигур. Параметры конфигурации системы катушек Гельмгольца, которая генерирует однородное поле наибольшего размера, выдаются в виде отчета пользователю – подпрограмма вывода оптимальной конструкции системы (ПВОКС). В случае если в качестве объекта исследования была выбрана конфигурация системы, пользователю предлагается ввести ряд исходных данных: ввод сторон параллелепипеда сечения a и b , ввод пределов изменения радиуса катушек Гельмгольца r и расстояния между их центрами d , ввод значения тока в катушках I .

Затем происходит выполнение в цикле ППМ, ППСК и изменение параметров системы до тех пор, пока не будут достигнуты пределы изменения r и d . По окончании происходит выполнение ПВОКС.

В случае выбора круга в качестве геометрии сечения, пользователь вводит следующие исходные данные: значение радиуса кругового сечения катушки r_0 , среднего радиуса катушки r и расстояния между катушками d , значение тока в катушках I , производит выбор изменяемого параметра r , d . Затем происходит выполнение в цикле ППМ, ППСК и изменение параметров системы до тех пор, пока не будут достигнуты пределы изменяемого параметра. По окончании происходит выполнение ПВОКС.

При рассмотрении пары катушек Гельмгольца можно перейти к двумерному моделированию, так как распределение поля попарно симметрично во всех квадрантах системы координат.

Подпрограмма построения системы контуров и вписывания тригонометрической фигуры в область однородного поля (ППСК) работает следующим образом. На первом шаге строится непрерывный контур, показанный на рисунке 5а, состоящий из 51 отрезка. Вдоль этого

контура строится распределение магнитного поля, показанное на рисунке 5б. По полученным результатам определяются область с заданной Однородностью Δ и все граничные точки, полученные пересечением линии, отсекающей Δ -ную однородность, и вертикальных линий отрезков контура. На рисунке 5б обозначена одна пара граничных точек А и В.

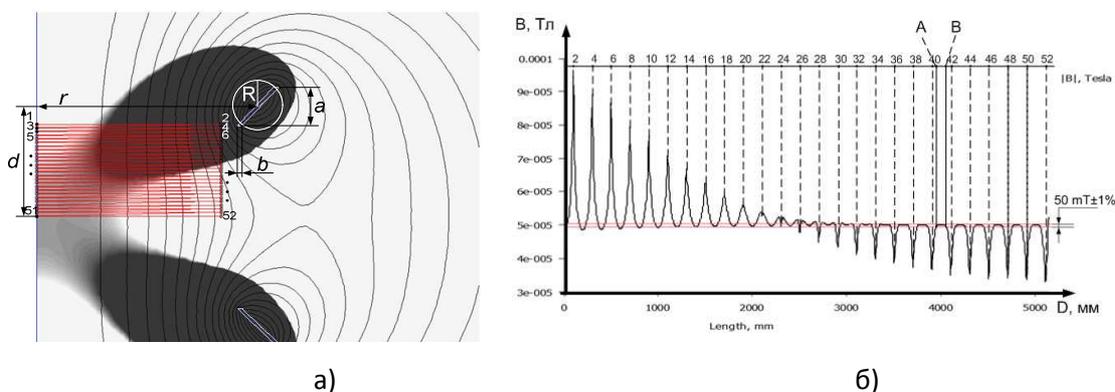


Рисунок 5 – Построение контура в среде *FEMM* 4.2 (а), распределение магнитной индукции вдоль контура (б)

В полученные граничные условия вписывается либо цилиндр, либо сфера (в зависимости от того, что было задано пользователем в начале выполнения алгоритма). Выбор оптимальной конфигурации системы производится исходя из сравнения объема полученной фигуры. Оптимальной считается конфигурация, генерирующая максимальный объем фигуры, внутри которой заключен *HFV* с заданным значением однородности.

Таким образом, в результате исследований разработана структурная схема системы калибровки магниточувствительных датчиков. Смоделирована конструкция системы ортогонально направленных катушек Гельмгольца как системы создания пространственно однородного магнитного поля и рассчитаны значения однородности вдоль средних линий. Разработан алгоритм программы, позволяющей в зависимости от входных данных получить оптимальную конфигурацию системы катушек Гельмгольца для индивидуальных инструментов калибровки трехкомпонентных ортогонально направленных МЧД. Построена кривая распределения магнитной индукции вдоль контура-сенсора.

Разработанный алгоритм позволит в короткие сроки определить наиболее подходящую конструкцию системы создания однородного магнитного поля, в частности катушек Гельмгольца, для систем калибровки трехкомпонентных магниточувствительных датчиков.

Результаты работы получены при поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания на проведение НИОКР, шифр заявки № 8.2935.2011

Список литературы

1. Алексанян Г.К. Определение структуры математической модели горизонтальной составляющей геомагнитного поля / Г.К. Алексанян, М.В. Ланкин [и др.] // Моделирование. Теория, методы и средства : материалы XI Междунар. науч.-практ. конф., Новочеркасск, 31 марта 2011 г. / Юж.-Рос. гос. техн. ун-т (НПИ). - Новочеркасск : ЮРГТУ, 2011. – С. 31–36.
2. Бараночников М.Л. Микромагнитоэлектроника. Т. 1. – М. : ДМК Пресс, 2001. – 544 с.
3. Бреус Т.К. Магнитные бури: медико-биологические и геофизические аспекты / Т.К. Бреус, С.И. Рапопорт. – М. : Советский спорт, 2003. – 192 с.
4. ГОСТ 8.030-91. Государственный первичный эталон и государственная поверочная схема для средств измерения магнитной индукции постоянного поля в диапазоне от 1×10^{-12} в ст. минус 12 до 5×10^{-2} в ст. минус 2 Тл, постоянного магнитного потока, магнитной индукции и магнитного момента в интервале частот от 0 до 20 000 Гц. Государственная система обеспечения единства измерений. – М. : Изд-во стандартов, 1992. – 10 с.
5. Маркарян Н.Р. Система для калибровки мобильного устройства прогнозирования геомагнитных бурь / Ланкин М.В., Алексанян Г.К. // Студенческая научная весна - 2011 : материалы Регион. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых вузов Ростовской области / Юж.-Рос. гос. техн. ун-т (НПИ). - Новочеркасск : ЮРГТУ, 2011. - С. 188-189.
6. Официальный сайт компании Ansoft [Электронный ресурс]. - URL: <http://www.ansys.com/> (дата обращения: 21.03.2013).
7. Яновский Б.М. Земной магнетизм. – Л. : Изд-во Ленингр. ун-та, 1978. – 592 с.
8. Finite Element Method Magnetics. Version 4.2. User's manual [2010]. - URL: <http://femm.foster-miller.com> (дата обращения: 21.03.2013).
9. Field homogeneity in Helmholtz coils. Serviciencia, S. L. Application Note NAS02-i [2008]. - URL: <http://www.serviciencia.es/> (дата обращения: 25.03.2013).

Рецензенты:

Кириевский Е.В., д.т.н., профессор кафедры «Информационные и измерительные системы и технологии» ФГБОУ ВПО «Южно-Российский государственный технический университет (Новочеркасский политехнический институт)», г. Новочеркасск.

Гречихин В.В., д.т.н., доцент кафедры «Информационные и измерительные системы и технологии», ФГБОУ ВПО «Южно-Российский государственный технический университет (Новочеркасский политехнический институт)», г. Новочеркасск.