

Феррозонды в бортовых системах взвешивания большегрузных самосвалов



Анатолий НИКИШЕЧКИН



Лев ДУБРОВИН



Владимир ДАВЫДЕНКО

Анатолий Петрович Никишечкин¹, Лев Михайлович Дубровин², Владимир Иванович Давыденко³

¹ МГТУ «Станкин», Москва, Россия.

² Российский университета транспорта, Москва, Россия.

³ Московская железная дорога – филиал ОАО «РЖД», Москва, Россия.

✉ ¹ anatolij-petrovich@yandex.ru.

АННОТАЦИЯ

В статье приводится обзор результатов исследования авторами возможности использования напряжённости магнитного поля, создаваемой тяговыми двигателями постоянного тока, в качестве полезного сигнала, несущего информацию о массе перевозимого карьерным самосвалом груза.

Целью исследований являлся поиск способа определить массу груза карьерного самосвала. В отличие от имеющихся бортовых систем взвешивания изучена возможность создания компактного автономного устройства, которое не требует встраивания датчиков в конструкцию и электрические цепи грузовика.

Рассматриваются проблемы повышения эффективности измерительных устройств на базе феррозондовых преобразователей с целью использования их в качестве бортовых систем оценки массы груза. Увеличить чувствительность феррозонда можно за счёт увеличения как амплитудного, так и действующего значения напряжения, подаваемого на его обмотку возбуждения. Предлагаемая оригинальная схема запитки обмотки возбуждения феррозонда от генератора модулированных сигналов, выполненного на логических элементах, позволяет повысить напряжение, подаваемое на обмотку возбуждения феррозонда, без увеличения напряжения питания, за счёт увеличения выбро-

сов напряжения на фронтах прямоугольных модулированных импульсов высокой частоты, а также за счёт резонансных явлений. Использование такого генератора исключает влияние обмотки возбуждения феррозонда на частоту генератора, так как рабочей частотой феррозонда становится частота модулирующих сигналов, которая остается неизменной. Повышение чувствительности даёт возможность устанавливать датчик в любом удобном месте кабины самосвала, а не в непосредственной близости от тяговых двигателей.

Оценка массы груза осуществляется в процессе движения самосвала по контрольному участку пути. Показания снимаются с амперметра (миллиамперметра), шкала которого предварительно оттарирована в единицах массы. Измерения массы должны производиться при тех же режимах движения самосвала и с тем же расположением феррозонда, что и при тарировании шкалы измерительного прибора. Контрольный участок пути, на котором проводятся измерения, должен быть тем же или аналогичным тому, на котором тарировался измерительный прибор.

Предлагаемое устройство отличается простотой использования, характеризуется малым потреблением энергии, компактно, не содержит дорогостоящих элементов и не требует тщательного обслуживания.

Ключевые слова: транспорт, бортовые системы взвешивания, масса груза, карьерный самосвал, тяговые двигатели постоянного тока, напряжённость магнитного поля, феррозонды.

Для цитирования: Никишечкин А. П., Дубровин Л. М., Давыденко В. И. Феррозонды в бортовых системах взвешивания большегрузных самосвалов // Мир транспорта. 2021. Т. 19. № 3 (94). С. 25–32. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2021-19-3-3>.

Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.
The full text of the article in English is published in the second part of the issue.



ВВЕДЕНИЕ

Определение массы груза большегрузного транспорта, используемого на горных предприятиях с открытым способом добычи, традиционно является важнейшей задачей, решение которой может осуществляться по-разному.

Грубая оценка степени заполнения кузова горной массой, имеющая место примерно на 95 % предприятий, предусматривает соблюдение машинистом экскаватора паспорта загрузки. Паспорт загрузки определяет для каждого типа транспортного средства порядок размещения груза и равномерность его распределения в кузове, а также необходимые параметры «шапки» загрузки [1].

Однако соблюдение требований паспорта загрузки малоэффективно для оценки массы груза из-за своей неточности. При контроле по паспорту загрузки зона «недогруз–перегруз» составляет $\pm 25\%$ и более [1, с. 132].

Для более точного измерения используют стационарные автомобильные весы. Такие весы надёжны, имеют большой запас прочности, однако требуют полного заезда грузовика на платформу, что приводит к потере времени. Кроме того, место погрузки может достаточно часто меняться. Существуют и передвижные весы, но использовать их не всегда удобно [3, с. 147].

Наиболее эффективен автоматический контроль загрузки с помощью встроенных бортовых систем. Бортовые системы взвешивания (БСВ) используют специальные датчики, например, датчики давления и тензодатчики [4].

Наиболее часто на карьерных самосвалах применяют бортовые системы, определяющие массу груза по установившимся значениям давления газа в цилиндрах подвески. Эти системы достаточно просты в установке, но применяются они только для автомобилей с пневматической подвеской на всех осях.

Недостатком таких систем является зависимость результатов измерений от вязкости масла в гидросистеме, которая меняется при изменении температуры окружающего воздуха, что, в свою очередь, влияет на давление в системе. Это вносит погрешности в показания бортовой системы взвешивания на датчиках давления. Погрешность объясняется также наличием значительных сил сухого трения в цилиндрах подвески. Некоторые производители решают проблему погрешно-

сти, вводя в электронную программу БСВ расчёт поправок [2].

В отличие от систем на основе датчиков давления, системы с тензодатчиками обеспечивают более высокую точность. Тензодатчики в бортовых системах устанавливаются между рамой и кузовом автомобиля и могут использоваться на любых автомобилях с самосвальным кузовом с любым типом подвески. Бортовые системы на основе тензодатчиков надёжны и нетребовательны в обслуживании. Однако такие системы требуют замены штатных узлов крепления кузова на узлы с тензодатчиками, что доступно только квалифицированным специалистам в заводских условиях.

Начиная с 2000 года бортовые системы взвешивания разрабатываются различными компаниями, в частности, «БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ» (г. Жодино, Республика Беларусь), компанией «Вист Групп» (Москва, Российская Федерация). Системы строятся на базе бортового контроллера, осуществляющего сбор и обработку большого количества показателей работы автосамосвала [7]. Такие системы обеспечивают нормализацию загрузки в пределах $\pm 8\%$ относительно паспортной грузоподъёмности [5].

Целью проведённого авторами исследования являлся поиск способа оценки массы груза карьерного самосвала, упрощающего измерения, не требующего тщательного встраивания датчиков в элементы конструкции большегрузного транспорта. Такой способ мог бы повысить эффективность технологического процесса оценки массы груза, существенно сократить энергетические, временные и финансовые затраты без использования сложного и дорогостоящего технологического оборудования и без привлечения квалифицированного персонала.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Предлагаемое решение

Предлагаемое решение заключается в следующем: измеряется величина напряжённости магнитного поля, создаваемого тяговыми двигателями постоянного тока карьерного самосвала. Так, самосвал БелАЗ-75121 использует тяговые двигатели ДК-722Е. Это коллекторные двигатели постоянного тока, размещаемые в ступицах колёс. Как известно, величина тока, потребляемого тяговым двигателем, определяется величиной нагрузки на



Рис. 1. Устройство феррозонда: H – поле возбуждения феррозонда, H_0 – измеряемое магнитное поле (выполнено авторами).

его вала, которая, в свою очередь, зависит от массы перевозимого груза и условий движения – скорости, особенностей данного участка пути (горка, уклон, качество дорожного полотна и др.).

Ток двигателя вызывает постоянное, медленно меняющееся магнитное поле, напряжённость которого может быть измерена. Использование в качестве диагностического параметра не тока двигателя, а напряжённости магнитного поля, создаваемого двигателем, позволяет осуществлять измерение бесконтактным способом, без вмешательства в электрические цепи [10].

В предлагаемом решении используется связь между напряжённостью магнитного поля, создаваемого двигателем постоянного тока, и нагрузкой на валу двигателя, определяющей массу самосвала.

Для измерения напряжённости магнитного поля могут использоваться различные датчики, в частности феррозонды, представляющие собой преобразователи величины напряжённости магнитного поля в величину тока. Феррозондовый метод измерения напряжённости достаточно прост, хорошо изучен и позволяет добиться необходимой точности [8; 9; 15; 16].

Двигатели большегрузных самосвалов создают достаточно сильное магнитное поле, поэтому нет необходимости установки феррозонда в непосредственной близости от двигателя или от силовых цепей питания двигателя. В качестве устройства индикации используется амперметр (миллиамперметр), шкала которого оттарирована в единицах массы.

Практически место установки феррозонда значения не имеет – важно лишь, чтобы оно

было одним и тем же – как при тарировании шкалы миллиамперметра, так и при измерениях.

Тарирование шкалы осуществляется в следующей последовательности:

1. Выбирается участок пути с определёнными параметрами, который объявляется контрольным. Например, участок с постоянным уклоном и одинаковым качеством дорожного покрытия. Желательно выбирать участок с такими параметрами, которые наиболее характерны для предполагаемого маршрута движения грузовика.

2. Осуществляется движение грузовика без груза по контрольному участку пути в определённом режиме (например, с постоянной скоростью). Время движения должно быть достаточно для снятия показания миллиамперметра, которое принимается за ноль массы груза.

3. Осуществляется движение в том же режиме по тому же участку (или аналогичному) с грузом, масса которого известна. Показания миллиамперметра будут соответствовать массе груза.

4. Действия, выполняемые в пункте 3, для более точного тарирования шкалы и исключения ошибок можно повторить с другой массой груза. При этом шкала оттарирован-

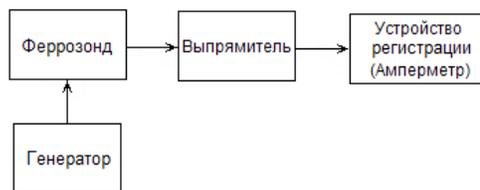


Рис. 2. Структурная схема измерительного устройства (выполнено авторами).



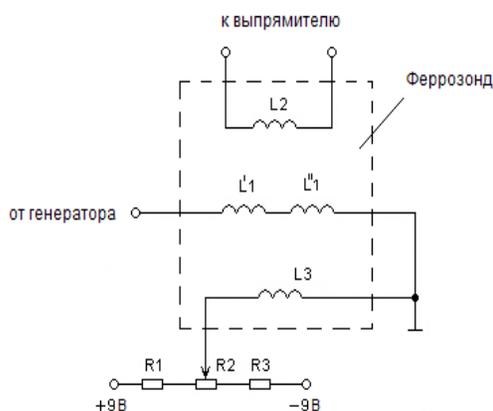


Рис. 3. Схема включения обмоток феррозонда (выполнена авторами).

ного миллиамперметра оказывается практически линейной.

Для измерения массы необходимо:

1. Обеспечить контрольный участок пути или участок, аналогичный контрольному по своим параметрам, на котором производилось бы тарирование и которому соответствует шкала измерительного прибора (миллиамперметра).

2. Обеспечить движение в течение не менее 5–10 секунд по контрольному участку с той же постоянной скоростью, на которой производилось тарирование шкалы измерительного прибора.

3. Бесконтактно произвести измерения с помощью измерительного устройства на базе феррозондового преобразователя и снять показания с измерительного прибора устройства, шкала которого предварительно оттарирована в единицах массы.

При измерении массы груза, перевозимой автомобилями одной модели, нет необходимости в тарировании шкалы измерительного прибора для каждого автомобиля в отдельности. Достаточно обеспечить лишь одинаковое место установки чувствительного элемента (феррозонда).

Его устройство следующее (рис. 1): поверх двух сердечников с обмотками L'_1 и L''_1 располагается измерительная обмотка L_2 .

Для компенсации влияния посторонних источников предусмотрена дополнительная третья обмотка L_3 , расположенная поверх основных обмоток (на рис. 1 не показана).

Структурная схема измерительного устройства, посредством которого реализуется способ, представлена на рис. 2.

Структурная схема включает:

- генератор импульсов, формирующий прямоугольные импульсы, подаваемые на обмотку возбуждения L_1 феррозонда;
- феррозонд, включающий три обмотки;
- выпрямитель;
- устройство регистрации – миллиамперметр.

Схема включения обмоток феррозонда представлена на рис. 3.

Компенсация посторонних полей осуществляется при выключенном двигателе самосвала переменным резистором R_2 установкой нулевого значения тока, измеряемого миллиамперметром. Величина резисторов R_1 и R_3 выбирается в зависимости от используемого миллиамперметра и величины напряжения.

Эксперименты показали (и это хорошо согласуется с данными литературных источников), что эффективность феррозондовых преобразователей в значительной степени определяется амплитудой, частотой и формой сигнала возбуждения; при этом прямоугольная форма сигнала даёт лучший результат по сравнению с синусоидальной или треугольной [14; 15].

Для запитки обмотки возбуждения феррозонда может использоваться простой генератор прямоугольных импульсов, схема которого представлена на рис. 4.

Схема содержит четыре логических элемента НЕ (микросхема К561 ЛН2), питающихся от источника 9 вольт. Собственно генератор – первые три элемента НЕ. Четвёртый элемент НЕ (DD1.4) полезен для исключения влияния обмотки возбуждения феррозонда на

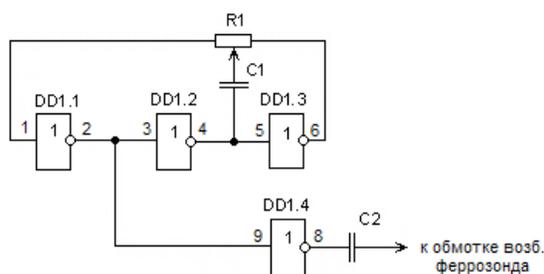


Рис. 4. Генератор прямоугольных импульсов для запитки обмотки возбуждения феррозонда (выполнено авторами).

работу генератора. Резистор R_1 и ёмкость C_1 – частотозадающие элементы. Резистор R_1 обеспечивает регулировку частоты генератора. Для описанного выше феррозонда используется частота 2 кГц. Схема простая, отличается малым потреблением мощности, позволяет обеспечить компактную и экономную реализацию и делает возможным сократить размеры измерительного устройства.

В схеме используется ёмкостная связь генератора с обмоткой возбуждения феррозонда (ёмкость C_2 на рис. 4). Это позволяет исключить постоянную составляющую сигнала генератора и, следовательно, снизить ток обмотки возбуждения и потребляемую мощность измерительного устройства [15].

Использование в качестве генератора схемы, построенной на логических элементах НЕ (рис. 4), делает измерительное устройство простым, надёжным и компактным.

Проведённые исследования показали, что чувствительность феррозонда можно увеличить за счёт увеличения напряжения (амплитудного и действующего значения), подаваемого на обмотку возбуждения от генератора. С этой целью можно использовать резонансные явления, возникающие в образовавшейся последовательной цепи: конденсатор C_2 – обмотка возбуждения феррозонда. Подбором величины ёмкости соединительного конденсатора C_2 и частоты генератора можно добиться резкого повышения чувствительности феррозонда. Это объясняется дополнительным ростом напряжения на обмотке возбуждения за счёт возникающего резонанса напряжения.

Исследования также показали, что при повышенной частоте запитки феррозонда повышается напряжение на обмотке возбуждения за счёт выбросов напряжения, возникающих на положительных и отрицательных фронтах

прямоугольных импульсов при работе генератора на индуктивную нагрузку. Но для существенного повышения напряжения (и, как следствие, чувствительности феррозонда) необходима частота запитки порядка 100 кГц и более. Однако паспортная частота феррозонда, на которой его работа наиболее эффективна, ниже этих значений.

Таким образом, для повышения чувствительности феррозонда требуется увеличивать частоту напряжения, подаваемого на обмотку возбуждения, на этой повышенной частоте добиваться резонанса напряжения, но при этом обеспечивать рабочую частоту запитки обмотки возбуждения феррозонда, заданную в паспорте.

Для увеличения частоты напряжения запитки феррозонда и сохранения требуемой паспортной частоты предлагается использовать для запитки феррозонда два генератора. Первый генератор формирует модулирующие прямоугольные импульсы, которыми запитывается обмотка возбуждения. Частота следования этих импульсов определяется рабочей частотой феррозонда. Первый генератор управляет работой второго генератора, который формирует модулируемые прямоугольные импульсы повышенной частоты. На этой частоте (при определённой величине ёмкости соединительного конденсатора) реализуется резонанс напряжения и становится заметно влияние выбросов напряжения на амплитудное и действующее значение напряжения импульса, формируемого первым генератором. При этом высокочастотные импульсы второго генератора имеют место только в моменты наличия импульсов первого генератора.

Доработанная схема запитки обмотки возбуждения приобретает вид, показанный на рис. 5.



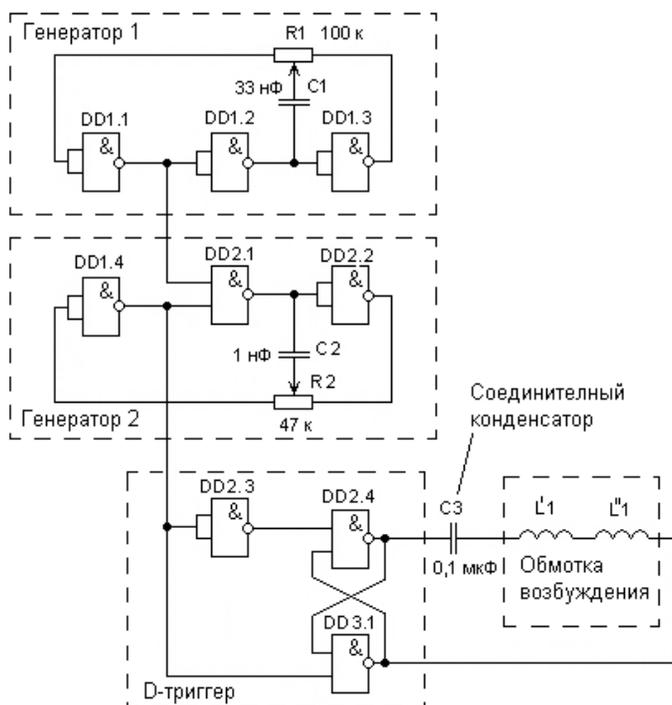


Рис. 5. Доработанная схема запитки обмотки возбуждения феррозонда (выполнена авторами).

Генератор 1 и генератор 2 однотипные, оба выполнены на трёх элементах 2И-НЕ микросхемы 564ЛА7. Амплитуды формируемых ими импульсов определяются напряжением питания генераторов. Элементы R , C генераторов задают необходимые частоты. Переменное сопротивление $R1$ генератора 1 обеспечивает настройку модулирующих импульсов на рабочую частоту, указанную в документации на феррозонд. Переменное сопротивление $R2$ генератора 2 задаёт высокую частоту модулированных импульсов, обеспечивающую резонанс напряжения на обмотке возбуждения. Величина ёмкости соединительного конденсатора $C3$ при этом, как правило, не превышает 0,1 мкФ.

На рис. 6 представлены временные диаграммы напряжений, поясняющие назначение и работу отдельных частей схемы, показанной на рис. 5.

На частотах 100–200 кГц модулированных импульсов заметно сказывается влияние выбросов напряжения (на рис. 6 не показаны), имеющих место при работе на индуктивную нагрузку, на величину как амплитудного, так и действующего значения напряжения на обмотке возбуждения феррозонда.

Длительность выбросов невелика и составляет единицы микросекунд, однако амплитуда их может в несколько раз превышать напряжение в прямоугольном импульсе. А на повышенной частоте следования модулированных импульсов их длительность становится соизмеримой с длительностью самих импульсов и влияние выбросов на напряжение обмотки возбуждения значительно увеличивается.

Дальнейшее увеличение частоты свыше 200 кГц нежелательно, так как приводит к заметному повышению потребляемой мощности.

В схеме на рис. 5 напряжение с выхода генератора 2 подаётся на обмотку возбуждения через D -триггер. Это даёт возможность получить двуполярную форму напряжения с удвоенным размахом напряжения, что также увеличивает чувствительность измерительного устройства. Кроме того, при использовании триггера уменьшается влияние обмотки возбуждения феррозонда на работу генератора.

Такая доработка схемы генератора позволяет заметно увеличить чувствительность феррозондового преобразователя без увеличения напряжения источника питания.

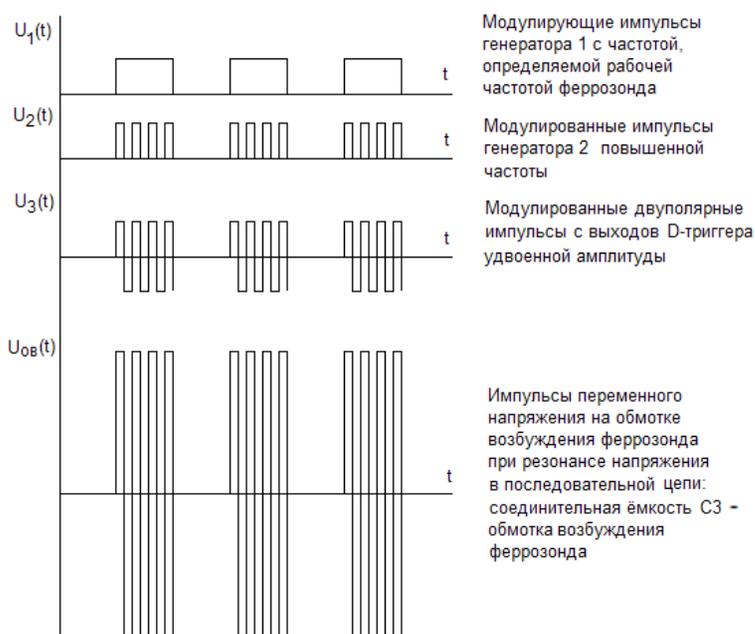


Рис. 6. Временные диаграммы напряжений (выполнено авторами).

Экспериментальная проверка

В экспериментах использовался феррозонд, имеющий следующие обмоточные данные:

- Диаметр провода обмотки возбуждения 0,3 мм, число витков каждой половины обмотки возбуждения 200. Намотка однослойная, виток к витку. Подключается к генератору импульсов.

- Измерительная обмотка: число витков 2000, диаметром провода 0,1 мм. Обмотка многослойная, виток к витку. Измерительная обмотка подключается через выпрямитель к устройству регистрации, в качестве которого используется амперметр постоянного тока (миллиамперметр).

- Диаметр провода дополнительной обмотки 0,1 мм, число витков 500.

Для защиты феррозонда от посторонних внешних воздействий использовался защитный кожух, представляющий собой трубку из латуни [14].

Экспериментальная проверка проводилась авторами на Экибастузском угольном бассейне (разрез «Северный») с большегрузными самосвалами БелАЗ-75121, использующими тяговые двигатели ДК-722Е. Эксперимент показал практически полное совпадение значения массы груза, полученного

с помощью феррозондового измерительного устройства, со значением, измеренным на автомобильных весах. Также экспериментально установлено, что показания измерительного устройства не зависят от неровности дорожного полотна. Кроме того, не требуется строгого соответствия измерительного участка пути участку, на котором производилось тарирование измерительного прибора. Главное обеспечить аналогичный уклон пути, а также ту же скорость без резких рывков и торможений.

ТЕХНИЧЕСКИЙ РЕЗУЛЬТАТ И ВЫВОДЫ

Предлагаемый бесконтактный способ измерения массы груза исключает необходимость встраивания датчиков в элементы конструкции и в электрические цепи автомобиля, не требует сложного технологического оборудования, снижает время и затраты на измерения, обеспечивая при этом достаточную точность.

Измерительное устройство с феррозондом и с миллиамперметром может быть установлено практически в любом месте машины, что обеспечивает удобство фиксации результатов измерения.

Предлагаемый способ отличается простотой использования. Устройство, реали-



зующее способ, характеризуется малым потреблением энергии, компактно, не содержит дорогостоящих элементов и не требует тщательного обслуживания. Подготовка устройства к работе заключается в тарировании шкалы измерительного прибора (миллиамперметра) в единицах массы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Файнвлит М. А., Ильвульдин Д. Х. Обоснование паспорта загрузки автосамосвалов HD-1200 и Cat-785 на Удачинском ГОКе // Горный журнал. – 2000. – № 7. – С. 49–51.
2. Дьяков В. А. Транспортные машины и комплексы открытых разработок. – М.: Недра, 1986. – 344 с.
3. Васильев М. В. Транспортные процессы и оборудование на карьерах. – М.: Недра, 1986. – 240 с.
4. Кулешов А. А., Семёнов М. А. Эффективность и перспективы применения бортовых систем контроля загрузки и учёта работы карьерных автосамосвалов // Горные машины и электромеханика. – 2000. – № 3. – С. 35–38.
5. Семёнов М. А., Большунова О. М. Повышение точности взвешивания массы груза в кузове карьерного автосамосвала // Горное оборудование и электромеханика. – 2009. – № 9. – С. 39–41.
6. Семёнов М. А., Большунова О. М. Контроль загрузки карьерных автосамосвалов // Записки Горного института. – СПб. – 2008. – Т. 178. – С. 143–145.
7. Руденко В. А., Клебанов А. Ф. Опыт применения бортовых контроллеров на карьерных самосвалах «БелАЗ» // Горная промышленность. – 2002. – № 6. – С. 38–39.
8. Афанасьев Ю. В. Феррозондовые приборы. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 188 с.
9. Миловзоров В. П. Электромагнитные устройства автоматики. – М.: Высшая школа, 1974. – 414 с.
10. Никишечкин А. П., Дубровин Л. М., Давыденко В. И. Двигатель постоянного тока как источник диагностической информации // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2016. – № 7. – С. 53–58. [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26700269>. Доступ 24.12.2020.
11. Никишечкин А. П., Дубровин Л. М., Давыденко В. И. Измерение массы груза подъёмно-транспортных устройств по параметрам магнитного поля, создаваемого двигателем постоянного тока // Вестник МГТУ «Станкин». – 2016. – № 1. – С. 64–67.
12. Никишечкин А. П., Дубровин Л. М. Оперативное определение силы резания по параметрам магнитного поля, создаваемого двигателем постоянного тока привода главного движения // Вестник МГТУ «Станкин». – 2015. – № 4. – С. 42–45. [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25286530>. Доступ 24.12.2020.
13. Баранова В. Е. Измерение слабого магнитного поля на основе феррозондового датчика / Дис... канд. техн. наук: 05.11.01. – Томск, 2015. – 134 с.
14. Дубровин Л. М., Никишечкин А. П., Давыденко В. И. Способ оценки массы железнодорожного состава // Мир транспорта. – 2016. – Т. 14. – № 2 (63). – С. 48–55. [Электронный ресурс]: <https://mirtr.elpub.ru/jour/article/view/909/1185>. Доступ 24.12.2020.
15. Дубровин Л. М., Никишечкин А. П., Давыденко В. И. Повышение эффективности измерительных устройств на базе феррозондовых преобразователей // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2018. – № 2. – С. 28–33. [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32607744>. Доступ 24.12.2020.
16. Никишечкин А. П., Дубровин Л. М., Давыденко В. И. Частотометрический способ построения измерительных устройств на базе феррозондового преобразователя // Вестник МГТУ «Станкин». – 2019. – № 4 (51). – С. 28–31. [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41866485>. Доступ 24.12.2020.
17. Пахомов П. И., Каплина Т. Ю. Автоматическое взвешивание горной массы, перевозимой карьерным автотранспортом // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2006. – № 5. – С. 268–274. [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=9484915>. Доступ 24.12.2020.
18. Nelson, L. J. A load on the road. Traffic Technol. Int. 2002. June-July. [Электронный ресурс]: <https://www.semanticscholar.org/paper/A-LOAD-ON-THE-ROAD-Nelson/dc94ac717247ec58933f8687b96bb86097d86282>. Доступ 24.12.2020.
19. Verfahren und Vorrichtung zur Ermittlung des Gewichts der Masse eines Fahrzeugs. Заявка 19963402 Германия, G 01 G19/08/Ries-Mueller Klaus; Robert Bosch GmbH. – № 19963402.5.
20. Verfahren zur Feststellung der Gewichtsbelastung einer gegenueber dem Fahrzeugaufbau gefederten, luftbereiften Fahrzeugachse. Заявка 10127567 Германия МПК7 В 60 P 5/00B 60 G 17/04 Ebert Joerg; BPW Bergische Achsen KG. – N 10127567.6; Заявл. 06.06.2001; Опубл. 12.12.2002.
21. Lenz, J. E. A Review of Magnetic Sensors. Proceeding of the IEEE, 1990, Vol. 78, Iss. 6, pp. 973–989. DOI: 10.1109/5.56910.
22. Ripka, P. Magnetic Sensors and Magnetometers. Boston: Artech house, 2001, 494 p.
23. Baschiroto, A., Dallago E., Ferr, M., Malcovati, P. A 2D Micro-Fluxgate Earth Magnetic Field Measurement Systems with Fully Automated Acquisition Setup. Measurement. 2010, Vol. 43 (1), pp. 46–53. DOI: 10.1016/j.measurement.2009.06.007.
24. Butta, M., Ripka, P. Model for coil-less fluxgate. Sensors and Actuators A: Physical, 2009, Vol. 156, Iss. 1, pp. 269–273. DOI: 10.1016/j.sna.2009.08.026.
25. Chong, Lei; Jian, Lei; Zhen, Yang; Tao, Wang; Yong, Zhou. A low power micro fluxgate sensor with improved magnetic core. Microsystem Technologies, 2012, Vol. 19, Iss. 4, pp. 591–598. DOI: 10.1007/s00542-012-1669-8. ●

Информация об авторах:

Никишечкин Анатолий Петрович – кандидат технических наук, доцент кафедры компьютерных систем управления МГТУ «Станкин», Москва, Россия, anatolij-petrovich@yandex.ru.

Дубровин Лев Михайлович – старший преподаватель кафедры электроэнергетики транспорта Российского университета транспорта, Москва, Россия, wellew49@gmail.com.

Давыденко Владимир Иванович – старший электромеханик технического центра автоматики и телемеханики Московской железной дороги ОАО «РЖД», Москва, Россия, vlad47mir@yandex.ru.

Статья поступила в редакцию 18.08.2020, одобрена после рецензирования 19.11.2020, актуализирована 27.02.2021, принята к публикации 23.04.2021.