МОДЕЛИРОВАНИЕ ДАТЧИКА СИСТЕМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ В МАСЛОСИСТЕМЕ МАШИН И АГРЕГАТОВ

MODELING OF THE ELECTROMAGNETIC SENSOR OF THE SYSTEM FOR DETECTION OF METALLIC PARTICLES IN THE OIL SYSTEM OF MACHINES

Н. А. Ишинбаев
N. A. Ishinbaev

Уфимский государственный
нефтяной технический университет
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

М. И. Кокоть
M. I. Kokot

Уфимский государственный
нефтяной технический университет
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

А. Н. Краснов
A. N. Krasnov

Уфимский государственный
нефтяной технический университет
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

В. С. Федоров
V. S. Fedorov

Уфимский государственный
нефтяной технический университет
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

В. В. Котов
V. V. Kotov

Уфимский государственный
нефтяной технический университет
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

Надёжность узлов и механизмов является залогом успешного использования современных аппаратов как для технологий добычи и переработки нефти, так и для других отраслей промышленности. Их долговечность зависит не только от характера нагрузок, но и от количества абразивных частиц в сопряжениях. Загрязнение смазочной жидкости продуктами износа трущихся деталей является одной из причин снижения работоспособности элементов машин.

В статье проводится физическое и математическое моделирование усовершенствованного электромагнитного датчика системы для обнаружения металлических частиц в маслосистеме машин и агрегатов с целью повышения его метрологических характеристик. Проанализированы физические процессы, происходящие при прохождении металлической частицы через датчик. На основе данного анализа получена математическая модель, связывающая между собой выходной сигнал датчика с параметрами датчика и металлической частицы. Полученная модель позволила выявить закономерности изменения амплитуды электродвижущей силы (ЭДС) от параметров системы. Так, амплитуда ЭДС прямо пропорциональна числу витков измерительной и намагничивающих катушек, скорости, объему и магнитной восприимчивости детектируемой частицы и нелинейно зависит от геометрических размеров системы. Это также позволило рассчитать амплитуду ЭДС в измерительной обмотке при заданных параметрах датчика и детектируемой частицы.

В ходе экспериментов удалось определить оптимальные геометрические параметры системы по критерию максимума амплитуды ЭДС в измерительной катушке. В статье приводится пример оптимизации геометрических размеров чувствительного элемента по критерию максимального выходного сигнала.

Ключевые слова

трибодиагностика,
электромагнитный
датчик, катушка,
металлическая
частица,
математическая
модель,
оптимизация

The reliability of units and mechanisms is the key to the successful use of modern equipment both for oil recovery and refining technologies and for other industries. Their durability depends not only on the nature of loads, but also on the amount of the abrasive particles in the pairings. Contamination of the lubricating liquid with products of friction parts wear is one of the reasons for the decrease in the operability of machine elements.

The article deals with physical and mathematical modeling of the improved electromagnetic sensor of the system for detection of metallic particles in the machine oil system, which is designed for improving the sensor's metrological characteristics. It is analyzed the physical processes occurring during a metal particle's movement through the sensor, on the basis of which a mathematical model is obtained that connects the sensor's output signal with the sensor's and the metal particle's parameters. The resulting model allows to reveal relation between change in the output signal's amplitude and system's parameters. Thus, the amplitude of the electromotive force (EMF) is directly proportional to the number of turns of the measuring and magnetizing coils, the speed, the volume and magnetic susceptibility of the detected particle, and it depends nonlinearly on the geometric dimensions of the system. This also made it possible to calculate the EMF amplitude in the measuring winding for the given parameters of the sensor and the detected particle.

During the experiments it was possible to determine the optimal geometric parameters of the system by the criterion of the EMF maximum amplitude in the measuring coil. The article contains an example of optimization of the geometric dimensions of the arrangement of the sensor's elements by the criterion of the maximum output signal.

Key words

tribomonitoring, electromagnetic sensor, coil, metal particle, mathematical model, optimization

Оперативная диагностика технического состояния и контроль работоспособности машинного оборудования, в частности, газотурбинных авиационных двигателей газоперекачивающих агрегатов, является залогом безопасности и экономической эффективности производства при транспортировке газа [1, 2].

Одним из эффективных направлений определения технического состояния трущихся поверхностей машин и агрегатов является трибодиагностика, в основе которой лежит анализ состава и концентрации продуктов износа в смазочной жидкости.

Анализ известных методов и средств трибодиагностики показывает:

— методы лабораторной трибодиагностики хорошо разработаны и оснащены широким спектром приборов;

— методы проточной трибодиагностики находятся на этапе становления и в настоящее время укомплектованы несколькими серийно выпускаемыми и дорогостоящими средствами.

В связи с изложенным развитие проточных методов трибодиагностики и совершенствование технических средств их реализации является актуальной.

В статье рассматривается физическое и математическое моделирование усовершенствованного электромагнитного датчика системы для обнаружения металлических частиц в маслосистеме с целью повышения его характеристик.

Упрощенная конструкция датчика представлена на рисунке 1. Датчик содержит две намагничивающие (правая и левая) и измери-

Рисунок 1. Картина магнитных полей при прохождении ферромагнитной частицы через левую катушку

тельную (средняя) тонкие катушки на каркасе из диэлектрика. Измерительная катушка выполнена по дифференциальной схеме (катушка с заземленной средней точкой), что обеспечивает эффективное подавление синфазных помех. Намагничивающие катушки являются симметричными и включены таким образом, чтобы их магнитные поля были направлены в противоположных направлениях.

Принцип действия датчика основан на явлении электромагнитной индукции — возникновении ЭДС в измерительной катушке при прохождении намагниченной металлической частицы [1].

При отсутствии металлических частиц в зоне датчика, а также при нахождении металлической частицы в плоскости измерительной катушки, магнитный поток, пронизывающий измерительную катушку, равен нулю из-за симметрии системы.

При попадании металлической частицы в зону датчика, например, в область левой катушки, как показано на рисунке 1, симметрия нарушается. Металлическая частица намагничивается и создает магнитный поток, пронизывающий измерительную катушку. При дальнейшем движении намагниченной частицы до измерительной катушки этот поток уменьшается до нуля. При дальнейшем движении частицы до правой катушки магнитный поток снова возрастает, но будет направлен в противоположную сторону.

Для определения зависимости ЭДС, возникающей в измерительной катушке, от параметров системы рассмотрим движение металлической частицы от левой катушки до измерительной.

Индукция результирующего магнитного поля в центре левой катушки определяется выражением [3, 4]

$$B_p = B_l - B_n = \frac{\mu_0 \cdot I_0 \cdot N_n}{2} \cdot \left(\frac{1}{R} - \frac{R^2}{(R^2 + r_{12}^2)^{\frac{3}{2}}} \right), \quad (1)$$

где B_l — индукция магнитного поля создаваемого левой катушкой;

B_n — индукция магнитного поля создаваемого правой катушкой;

I_0 — амплитуда токов, протекающих по намагничивающим катушкам;

N_n — число витков намагничивающих катушек;

R — средние радиусы катушек;

r_{12} — расстояние между левой и правой катушками;

μ_0 — магнитная постоянная.

Металлическая частица в центре левой катушки будет обладать намагниченностью

$$J_q = \chi_q \cdot \frac{B_p}{\mu_0} = \frac{\chi_q \cdot I_0 \cdot N_n}{2} \cdot \left(\frac{1}{R} - \frac{R^2}{(R^2 + r_{12}^2)^{\frac{3}{2}}} \right), \quad (2)$$

где χ_q — магнитная восприимчивость металлической частицы.

Для определения магнитного потока, создаваемого металлической частицей, заменим намагниченную частицу одновитковым контуром с равным магнитным моментом, т. е.

$$J_q \cdot V_q = I_3 \cdot S, \quad (3)$$

где V_q — объем металлической частицы.

Откуда ток в эквивалентном контуре с учетом (2) будет равен

$$I_3 = \frac{J_q \cdot V_q}{S} = \frac{V_q \cdot \chi_q \cdot I_0 \cdot N_n}{2 \cdot S} \cdot \left(\frac{1}{R} - \frac{R^2}{(R^2 + r_{12}^2)^{\frac{3}{2}}} \right). \quad (4)$$

Этот ток создает в измерительной катушке индукцию магнитного поля

$$B_3 = \frac{\mu_0}{2} \cdot \frac{I_3 \cdot R^2}{(R^2 + r_{13}^2)^{\frac{3}{2}}} = \frac{\mu_0 \cdot V_q \cdot \chi_q \cdot I_0 \cdot N_n \cdot R^2}{4 \cdot S \cdot (R^2 + r_{13}^2)^{\frac{3}{2}}} \cdot \left(\frac{1}{R} - \frac{R^2}{(R^2 + r_{12}^2)^{\frac{3}{2}}} \right) \quad (5)$$

и магнитный поток

$$\Phi = B_3 \cdot S. \quad (6)$$

При движении металлической частицы от левой катушки до измерительной, этот поток убывает до нуля. Следовательно, изменение магнитного потока будет равно $\Phi - 0 = \Delta\Phi$.

Учитывая, что время движения металлической частицы от левой катушки до измерительной равно

$$\Delta t = \frac{r_{13}}{v}, \quad (7)$$

где v — скорость движения металлической частицы, модуль ЭДС электромагнитной индукции [5], возникающий в измерительной катушке при движении металлической частицы, определяется выражением

$$E = \frac{N \Phi \cdot v}{r_{13}} = \frac{N \cdot v \cdot \mu_0 \cdot V_q \cdot \chi_q \cdot I_0 \cdot N_n \cdot R^2}{r_{13} \cdot 4 \cdot (R^2 + r_{13}^2)^{\frac{3}{2}}} \cdot \left(\frac{1}{R} - \frac{R^2}{(R^2 + r_{12}^2)^{\frac{3}{2}}} \right), \quad (8)$$

где N — число витков измерительной катушки.

Полученная зависимость связывает между собой амплитуду ЭДС в измерительной катушке с геометрическими (R, r_{13}, r'_{12}) параметрами датчика, параметрами катушек (N, N_n, I_0) и детектируемой частицы (v, V_q, χ_q).

Рассмотрим задачу оптимизации геометрических размеров датчика по критерию максимума выходного сигнала. Для этого построим график зависимости амплитуды ЭДС в измерительной катушке от расстояния между намагничивающими катушками при следующих исходных данных (рисунок 2). Число витков каждой из намагничивающих катушек равно 20, по которым протекает ток

0,1 А. Дальнейшее увеличение этих параметров нецелесообразно из-за возможности насыщения магнитного поля в детектируемой частице. Число витков измерительной катушки — 100. Радиус катушек равен 0,0125 м. Скорость движения ферромагнитной частицы равна 10 м/с.

Полученный график имеет экстремум в точке, соответствующей значению $r_{12} \approx 0,0064$ м.

Рисунок 2. График зависимости E от r_{12}

Выводы

Таким образом, математическая модель (8) позволяет решить следующие задачи:

1. Выявить закономерности изменения амплитуды ЭДС от параметров системы. Так, амплитуда ЭДС прямо пропорциональна числу витков измерительной и намагничивающих катушек, скорости, объему и магнитной восприимчивости детектируемой частицы и

нелинейно зависит от геометрических размеров системы.

2. Рассчитать амплитуду ЭДС в измерительной обмотке при заданных параметрах датчика и детектируемой частицы.

3. Определить оптимальные геометрические параметры системы по критерию максимума амплитуды ЭДС в измерительной катушке.

СПИСОК ИСПОЛЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Семенов А.С. Классификация и анализ эксплуатационных неисправностей газоперекачивающих агрегатов // Нефть и газ. Новые технологии в системе транспорта: сб. тр. / ТюмГНТУ. Тюмень, 2004. С. 65–69.
2. Краснов А.Н., Ишинбаев Н.А., Прахова М.Ю. Автоматизация аппаратов воздушного охлаждения масла газоперекачивающих агрегатов // Проблемы автоматизации технологических процессов добычи, транспорта нефти и газа: сб. тр. Уфа, 2016. С. 103–107.
3. Трофимова Т.И. Курс физики: учеб. пособие для вузов. 11-е изд. М.: Издательский центр «Академия», 2006. 560 с.
4. Тюшев А.Н., Вайсберг А.И. Курс лекций по физике: учеб. пособие. Новосибирск: СГГА, 2003. Ч. 2. Электричество и магнетизм, 150 с.
5. Магнитное поле кругового тока [Электронный ресурс]. URL: http://ens.tpu.ru/POSOBIE_FIS_

KUSN/электромагнетизм/01-6.htm (дата обращения: 20.09.2017).

REFERENCES

1. Semenov A.S. Klassifikaciya i analiz ehkspluatatsionnyh neispravnostej gazoperekachivayushchih agregatov [Classification and Analysis of Operational Malfunctions of Gas Pumping Units]. *Materialy Konferentsii «Neft i gaz. Novye tekhnologii v sisteme transporta»* [Proceedings of the Conference «Oil and Gas. New Technologies in Transport System»]. Tyumen, TGNTU, 2004. pp. 65–69. [in Russian].
2. Krasnov A.N., Ishinbaev N.A., Prahova M.Y. Avtomatizaciya apparatov vozdušnogo ohlazhdeniya masla gazoperekachivayushchih agregatov [Automation of Oil Air Cooling Units for Gas Pumping Units]. *Materialy Konferentsii «Problemy avtomatizacii tekhnologicheskikh processov dobychi, transporta nefii i gaza»* [Proceedings of

the Conference «Problems of Automation of Technological Processes of Extraction, Transportation of Oil and Gas»]. Ufa, 2016, pp. 103–107. [in Russian].

3. Trofimova T.I. *Kurs fiziki*: [Course of Physics]: Ucheb. posobie dlya vuzov. 11th Edition. Moscow, Akademiya Publ., 2006. 560 p. [in Russian].

4. Tyushev A.N., Vajsberg A.I. *Kurs lekcij po fizike: Tutorial* [Course of Lectures in Physics: Textbook].

Novosibirsk, SGGA, 2003. Part 2: Elektrichestvo i magnetism [Electricity and Magnetism]. 150 p. [in Russian].

5. *Magnitnoe pole krugovogo toka* [Magnetic Field of Circular Current] [Electronic Resource]. [in Russian]. Available at: http://ens.tpu.ru/POSOBIE_FIS_KUSN/chlektromagnetizm/01-6.htm (accessed 20.09.2017).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ABOUT THE AUTHORS

Ишинбаев Н. А., кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизация технологических процессов и производств», ФГБОУ ВО «УГНТУ», г. Уфа, Российская Федерация

N. A. Ishinbaev, Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Automation of Technological Processes and Production Department, FSBEI HE «USPTU», Ufa, Russian Federation

Краснов А. Н., кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизация технологических процессов и производств», ФГБОУ ВО «УГНТУ», г. Уфа, Российская Федерация

A. N. Krasnov, Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Automation of Technological Processes and Production Department, FSBEI HE «USPTU», Ufa, Russian Federation

e-mail: ufa-znanie@mail.ru

Котов В. В., аспирант кафедры «Автоматизация технологических процессов и производств», ФГБОУ ВО «УГНТУ», г. Уфа, Российская Федерация

V. V. Kotov, Post-graduate of Student Automation of Technological Processes and Production Department, FSBEI HE «USPTU», Ufa, Russian Federation

Кокот М. И. магистрант кафедры «Автоматизация технологических процессов и производств», ФГБОУ ВО «УГНТУ», г. Уфа, Российская Федерация

M. I. Kokot, Undergraduate Student of Automation of Technological Processes and Production Department, FSBEI HE «USPTU», Ufa, Russian Federation

Федоров В. С., магистрант кафедры «Автоматизация технологических процессов и производств», ФГБОУ ВО «УГНТУ», г. Уфа, Российская Федерация

V. S. Fedorov, Undergraduate Student of Automation of Technological Processes and Production Department, FSBEI HE «USPTU», Ufa, Russian Federation