

трические параметры системы, если в её состав входит один откалиброванный элемент (одного из компонентов датчика или излучателя). Это важное преимущество данного способа, поскольку калибровка отдельных элементов таких систем часто бывает затруднена или невозможна по конструктивным особенностям. Рассмотрена методика оценки качества такой калибровки систем. Методика реализована для задачи позиционирования трёхкомпонентного индукционного датчика в поле многокомпонентного излучателя для хирургической навигационной станции. Получены максимальные погрешности координат (1,8 мм) и для угла поворота ($0,5^\circ$) датчика в рабочей зоне в виде сферы диаметром 600 мм. Важным частным следствием применения методики является возможность использования результатов калибровки по направляющим косинусов компонентов трёхкомпонентных элементов магнитоизмерительных систем для их ортогонализации (путём необходимого виртуального поворота осей компонентов).

Л и т е р а т у р а

1. Максимов Г. Л., Носов Ф. В., Фогель А. Д., Семёнов В. В., Елисеев А. А. Комплексная диагностика технического состояния трубопроводов // Коррозия Территории Нефтегаз. 2017. № 2(37).

2. Li M., Bien T., Rose G. FPGA based electromagnetic tracking system for fast catheter navigation // Intern. J. Sci. Eng. Res. 2013. V. 4. Iss. 9. P. 2566–2570. DOI: 10.14299/ijser.2013.09.001.

3. Иванов Ю. М., Семёнов В. Г., Осипенко К. В. Угловое согласование трехкомпонентных дифференциальных магнитометров // Научное обозрение. Технические науки. 2017. № 2. С. 42–46.

4. Иванов Ю. М., Семёнов В. Г. Корректирующие матрицы – путь к повышению точности трехкомпонентных магнитометров // Измерительная техника. 2013. № 6. С. 46–51.

5. Schroeder T. An accurate magnetic field solution for medical electromagnetic tracking coils at close range // Appl. Phys. 2015. V. 117. 224504. DOI:10.1063/1.4922667.

6. Гилл Ф., Мюррей У., Райт М. Практическая оптимизация / Пер. с англ. М.: Мир, 1985.

7. Besl P. J., McKay N. D. A Method for Registration of 3-D Shapes // IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1992. V. 14. No. 2. P. 239–256.

8. Franz A. M., Haidegger T., Birkfellner W., Cleary K., Peters T. M., Maier-Hein L. Electromagnetic tracking in medicine – a review of technology, validation and applications // IEEE Trans. Medical Imaging. 2014. V. 33. No. 8. P. 1702–1725.

Дата принятия: 14.05.2018.

620.1.08:62-791.2

Измерение и первичная обработка сигнала датчика магнитной индукции в рабочей зоне электромеханической системы

А. Н. АНДРЕЕВ, Д. А. КОЛЕСНИЧЕНКО, Н. М. КОЛЕСНИЧЕНКО

Вологодский государственный университет, Вологда, Россия, e-mail: dimakolesnichenko@gmail.com

Рассмотрены варианты цифровой обработки сигналов твердотельных датчиков магнитной индукции, расположенных в рабочих зонах электромеханических преобразователей. Полученные результаты можно использовать при решении задач управления и технической диагностики.

Ключевые слова: индукция, рабочая зона электрической машины, цифровая обработка сигналов.

The article considers the options for digital processing of magnetic induction signals obtained by solid-state sensors in working areas of electromechanical transducers in order to use the results in control and technical diagnostics tasks.

Key words: induction, working area of the electric machine, digital signal processing.

Очувствление систем электромеханики, т. е. включение в их состав физических сенсоров, чаще всего осуществляется на основе комбинированных методов измерения электрических и механических величин. При комбинированном методе после непосредственного или косвенного измерения той или иной физической величины выполняются предварительная

обработка полученных данных и восстановление математическими методами недостающих параметров и переменных. Практически всегда при восстановлении указанных данных появляются дополнительные погрешности, в ряде случаев существенно превышающие инструментальные погрешности физических сенсоров. Иными словами, включение в сложную

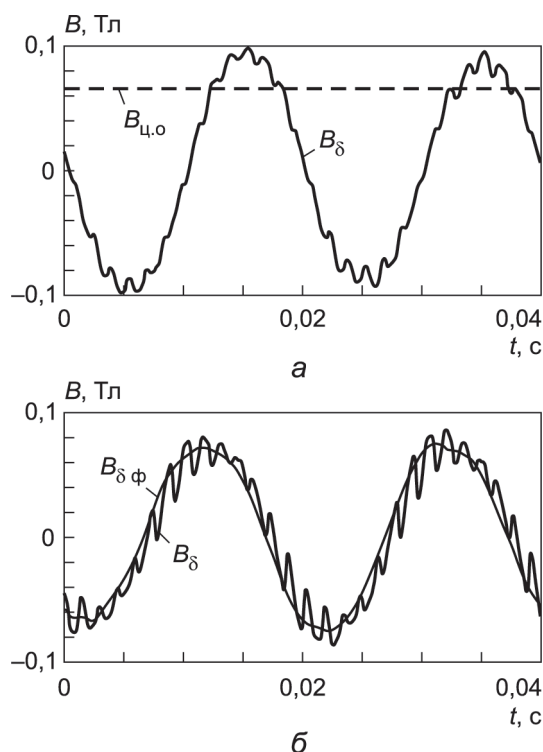


Рис. 1. Исходные B_δ и обработанные $B_{ц.о.}$, $B_{\delta ф}$ временные зависимости магнитной индукции в воздушном зазоре асинхронного двигателя при его нормальной работе от сети (а) и обрыве одной фазы (б)

электромеchanическую систему физических сенсоров с заданными метрологическими характеристиками, предназначенных для непосредственного измерения магнитной индукции, обеспечивает как минимум более высокую точность определения физической величины по сравнению с косвенными способами её вычисления. При переходе к задачам управления это гарантирует управляемость в более широких диапазонах воспроизведения выходных координат. Однако непосредственное измерение магнитной индукции в системах электромеchanики, в частности в электроприводах, осуществляется крайне редко [1]. При этом информационные преимущества прямого измерения параметров магнитного поля позволяют решать задачи управления электромеchanическими установками [1] и технической диагностики [2–4].

Современные методы измерений магнитной индукции базируются не только на инструментальной составляющей (датчики и первичные преобразователи физических величин в электрические сигналы), но и (в значительной степени) на информационной составляющей (использование технических средств, алгоритмов и программ, обеспечивающих вариативность цифровой обработки сигналов) [5]. Первичная обработка необходима, поскольку оцифрованные сигналы наряду с полезной информацией содержат большое количество артефактов, вызванных неидеальностью первичных преобразователей, неоднозначностью межкодовых переходов при аналого-цифровом преобразовании, коммутационными помехами дискретных элементов, помехами в каналах передачи данных и пр.

Информационный канал измерения магнитной индукции в рабочей зоне электромеchanического преобразователя содержит измерительный сенсор, узел оцифровки и модуль цифровой обработки сигнала. Для корректировки параметров и условий оцифровки аналогового сигнала (шага квантования, ступени квантования, общего времени сбора данных и др.) поток информации между узлом оцифровки и модулем цифровой обработки сигнала двунаправлен.

Обоснование выбора типа датчика и места его установки подробно представлено в работе [2]. Плёночный датчик магнитной индукции располагают непосредственно на зубце статора, а для гарантированного размещения в воздушном зазоре датчика магнитной индукции в пластиковом корпусе требуется незначительное снятие металла зубца магнитопровода статора электромеchanического преобразователя. К основным характеристикам используемого сенсора – датчика магнитной индукции типа SS49 относятся диапазоны индукции $B = \pm 0,1$ Тл и частоты $f \leq 500$ кГц, а также погрешности датчика $\delta = \pm 1\%$, нелинейности $\delta_n = 1,5\%$ и сопротивления нагрузочного резистора $\delta_c = \pm 1\%$. Основные характеристики системы сбора данных Lcard L783M – частота дискретизации $f_d = 3$ МГц и основная приведённая погрешность $\delta_{пр} = 1\%$. Максимальная приведённая погрешность преобразования, выраженная в виде суммы максимальных погрешностей и отклонений последовательно соединённых элементов измерительного комплекса, $\delta_{пр \max} = 4,5\%$.

Для подтверждения уровня информативности канала измерения сигнала датчика магнитной индукции и его применения при диагностировании электромеchanических устройств с целью выявления дефектов исследованы исходная B_δ и обработанная $B_{ц.о.}$ временные зависимости магнитной индукции в рабочей зоне (воздушном зазоре) асинхронного двигателя при непосредственном питании исправного асинхронного двигателя от сети (рис. 1, а). Отклонение сигнала датчика магнитной индукции в воздушном зазоре от синусоидальной формы объясняется неравномерностью распределения магнитного поля по длине воздушного зазора, зубцами на статоре и роторе и другими причинами. Таким образом, очевидно, что для решения задач управления частотно-регулируемыми асинхронными электроприводами, в которых появляются дополнительные высокочастотные составляющие из-за коммутационных помех силовых ключей, необходима первичная обработка оцифрованного сигнала. Рассмотрим несколько способов цифровой обработки данных для задач управления и технической диагностики.

Оценка среднеквадратичных значений сигналов датчика магнитной индукции с переменным шагом. В общем виде среднеквадратичное значение A дискретных сигналов оценивается по выражению

$$A = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^N a_i^2},$$

где N – общее число точек дискретного сигнала; a_i – мгновенное значение сигнала.

Результат цифровой обработки – зависимость $B_{ц.о.}(t)$ с шагом около четверти периода основной частоты – обозначена

на рис. 1, а пунктирной линией. При решении задач управления и идентификации [1, 6] наиболее приемлемым шагом при оценке среднеквадратичных значений является величина, равная периоду основной частоты или кратная этому периоду в сторону увеличения или уменьшения. В этом случае оценивается абсолютное значение магнитной индукции в рабочих зонах электромеханического преобразователя.

Фильтрация сигналов. При полноформатном решении задач управления с учётом мгновенных значений магнитной индукции требуется фильтрация сигналов без потери информационной составляющей, в том числе и фазового сдвига, который характерен для классических фильтров. Весьма эффективным представляется использование вейвлет-фильтра, при этом в обработанном сигнале отсутствует фазовый сдвиг [5]. Базовый алгоритм фильтрации с применением дискретного вейвлет-преобразования и его результаты представлены ниже.

При прямом вейвлет-преобразовании формируются матрицы аппроксимирующих $a_{j,k}$ и масштабирующих $d_{j,k}$ коэффициентов:

$$\begin{cases} a_{j+1,k} = \sum_n h_n a_{j,n+2k}; \\ d_{j+1,k} = \sum_n g_n a_{j,n+2k}, \end{cases}$$

где h_n – масштабные коэффициенты, вычисляемые по материнскому вейвлету; g_n – коэффициенты, вычисляемые по масштабным коэффициентам h_n .

Фильтрация осуществляется в результате изменения матрицы масштабирующих коэффициентов. Частоты фильтрации определяются уровнем разложения. После этого осуществляется обратное вейвлет-преобразование:

$$a_{j,n} = \sum_n h_{n-2k} a_{j+1,k} + \sum_n g_{n-2k} d_{j+1,k}.$$

Для экспериментов в качестве базового выбран вейвлет Добеши (уровень разложения 14). Результаты фильтрации в виде исходной B_δ и отфильтрованной $B_{\delta\phi}$ магнитной индукции асинхронного электродвигателя при обрыве одной его фазы представлены на рис. 1, б.

Дискретное преобразование Фурье. Разложение функции в ряд Фурье является мощным инструментом при решении самых разных задач. Отдельные гармонические составляющие ряда Фурье при его применении для анализа сигналов датчиков электромеханических систем несут в себе дополнительную информацию о возможных дефектах электродвигателя. В частности, рост амплитуд нечётных гармоник и гармоник «зубцовых пульсаций» является диагностическим признаком, свидетельствующим о наличии либо развитии дефектов электрической машины [2–4]. Прямое и обратное преобразования Фурье в дискретной форме имеют вид

$$X_p(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x_p(n) \exp\left(-j \frac{2\pi nk}{N}\right);$$

$$x_p(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_p(k) \exp\left(j \frac{2\pi nk}{N}\right),$$

где $X_p(k)$ – значения комплексных амплитуд синусоидальных сигналов; k – индекс частоты; $x_p(n)$ – значение сигнала в n -й точке.

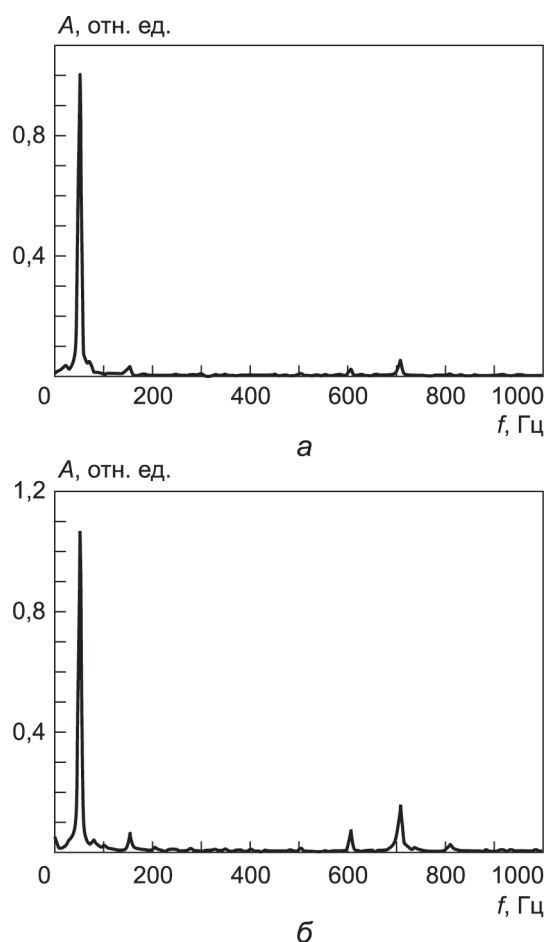


Рис. 2. Спектры сигнала A датчика магнитной индукции в воздушном зазоре исправного асинхронного двигателя (а) и при обрыве фазы двигателя (б)

На рис. 2 представлены графики спектров сигналов датчика магнитной индукции при работе исправного асинхронного двигателя и при обрыве фазы двигателя (исходные кривые показаны на рис. 1).

Заключение. По среднеквадратичным значениям оцифрованных сигналов датчиков магнитной индукции электромеханических систем можно оценить абсолютные значения магнитной индукции. Применение вейвлет-фильтрации позволяет с высокой точностью определить не только абсолютное значение сигнала, но и направление вектора магнитной индукции при установке двух датчиков, размещённых на ортогональных осях статора, что является минимально достаточным для организации векторного управления. Отсутствие фазового сдвига при вейвлет-фильтрации не требует дополнительной коррекции вычислений с учётом текущих частот.

Спектральный анализ на основе дискретного преобразования Фурье обеспечивает не только анализ системы в частотной области, но и обладает диагностической функцией. Подтверждено, что амплитуды отдельных гармонических составляющих имеют ряд диагностических признаков, свидетельствующих о наличии либо развитии определённых дефектов электромеханической системы.

Диагностическим признаком (критерием) работоспособного состояния электромеханической системы является совпадение текущего спектра с эталонным. Применительно к асинхронному двигателю диагностическим признаком обрыва фазы является рост амплитуды третьей гармоники спектра магнитной индукции, а виткового замыкания в обмотках статора – рост амплитуд третьей и пятой гармоник спектра.

Выбор вариантов частичной либо комплексной интеграции перечисленных ранее методов, сопровождающих непосредственное измерение физической величины, определяется уровнем решаемых задач, как при синтезе базовых алгоритмов управления, так и при реализации сервисных функций с учётом имеющихся у разработчика вычислительных ресурсов, ориентированных на работу в реальном масштабе времени.

Л и т е р а т у р а

1. **Андреев А. Н., Андреев М. А., Колесниченко Д. А., Шатков А. П.** Непосредственное управление моментом в асинхронном электроприводе на основании измерения магнитной индукции в воздушном зазоре // Системы управления и информационные технологии. 2017. № 2 (68). С. 78–81.
2. **Колесниченко Д. А., Елюков А. С., Шейбухов С. Н.** Быстродействующая система защиты и диагностирования

асинхронных электродвигателей // Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производства, технология и надежность машин, приборов и оборудования: Материалы 7^й Междунар. науч.-техн. конф. Вологда, ВоГТУ, 2012. С. 186–188.

3. **Бирюков Е. Н., Ершов Е. В.** Автоматизация контроля технического состояния опор скольжения агрегатов металлургического производства // Производство проката. 2008. № 2. С. 35–40

4. **Сидельников Л. Г., Афанасьев Д. О.** Обзор методов контроля технического состояния асинхронных двигателей в процессе эксплуатации // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое дело. 2013. № 7. С. 127–137.

5. **Пахолков И. В., Ершов Е. В., Воронов А. М.** Методы фильтрации значений в системе сбора данных // Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производства, технология и надежность машин, приборов и оборудования: Материалы 12^й Междунар. науч.-техн. конф. Вологда, ВоГУ, 2017. С. 180–183.

6. **Водовозов А. М., Елюков А. С.** Идентификация параметров асинхронной машины в установившихся режимах // Вестник ИГЭУ. 2010. № 2. С. 69–71.

Дата принятия: 29.05.2018.

535.36; 543.421; 543.422

Улучшение электрических характеристик измерительной аппаратуры на основе операционных усилителей Rail-to-Rail

А. И. СЕРГЕЕВ, А. А. СУВОРОВ

Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия, e-mail: anton.suvorov@urfu.ru

Описан способ, позволяющий увеличить динамический диапазон сигналов и уменьшить динамическую погрешность входных каскадов измерительной аппаратуры на основе операционных усилителей Rail-to-Rail. Разработана электрическая схема данной аппаратуры. Приведены результаты тестирования операционных усилителей Rail-to-Rail при следящем питании.

Ключевые слова: операционный усилитель Rail-to-Rail, следящее питание, динамический диапазон, частота единичного усиления.

Paper describes a method and electric circuit that allow to increase the dynamic range of signals and reduce the dynamic error of input cascades of the measuring equipment on the basis of operational amplifiers Rail-to-Rail. The experimental material is presented.

Key words: Rail-to-Rail operational amplifier, tracking supply, dynamic range, unity gain frequency.

Инструментальный операционный усилитель (ОУ) Rail-to-Rail является одним из основных компонентов входных каскадов современной прецизионной измерительной техники. Вопросы разработки новых, более совершенных по характеристикам, ОУ остаются актуальными и часто освещаются

в научных публикациях, например в изданиях IEEE и других [1–4]. Одним из мировых лидеров в области аналоговой микроэлектроники является компания Analog Devices (США). Электрические характеристики прецизионных ОУ Rail-to-Rail, выпускаемых этой компанией, приводятся в технической