

ошибка (MAE), в качестве оптимизатора наибольшую эффективность показал *Adamax* [7].

Для проверки предсказательной способности полученной модели было проведено сравнение коэффициента нелинейных искажений (КНИ) сигнала напряжения на измерительной обмотке во время проведения измерений в диапазоне амплитуд напряженности магнитного поля $H_m = 25 \dots 200$ А/м. Без синусоизации КНИ принимает значения от 2,5 до 15,5 % соответственно для нижней и верхней границ. Сравнение эффективности цифровой итерационной и нейросетевой синусоизации приведены на рис. 1. Граница допустимых значений КНИ (1 %) обозначена штриховой линией.

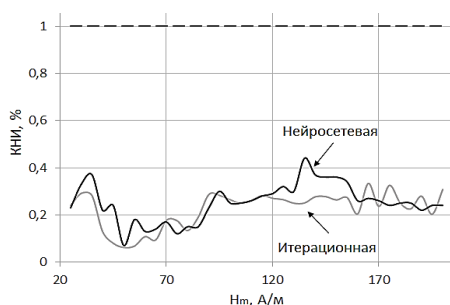


Рисунок 1 – Результаты применения итерационной (серый) и нейросетевой (черный) синусоизации

Как видно из приведенного графика, использование созданной нейросетевой модели для синусоизации магнитного потока имеет ту же степень эффективности, что и применение итерационной синусоизации, используемой для обучения модели. Это позволяет использовать синусоизацию, основанную на методах глубокого обучения,

при проведении измерений магнитных характеристик магнитомягких материалов.

Таким образом, представленная модель позволяет проводить синусоизацию с такой же результативностью, как и метод, на котором она основана. Вместе с этим нейросетевая синусоизация лишена таких побочных эффектов цифровых итерационных методов, как нестабильность и немонотонность намагничивающего процесса, которые влияют на магнитную историю испытуемого образца, что способно негативным образом отражаться на точности и повторяемости результатов измерений его параметров.

Литература

1. ГОСТ 12119.4-98 Сталь электротехническая. Методы определения магнитных и электрических свойств. Метод измерения удельных магнитных потерь и действующего значения напряженности магнитного поля. Мн.: Издательство стандартов, 1999 г.
2. Способ формирования синусоидальной индукции в ферромагнитном образце: пат. 10958 Республик Беларусь, МПК G 01R 33/12. / Брановицкий И.И., Путьрский М.Н.; заявитель и патентообладатель Институт прикладной физики НАН Беларуси. – № 20060894; заявлено 12.09.2006; опубликовано 30.04.2008. – 3 с.
3. Keras: The Python Deep Learning library. URL: <https://keras.io/>.
4. TensorFlow. An open source machine learning library for research and production. URL: <https://www.tensorflow.org/>.
3. Кифер, И.И. Испытания ферромагнитных материалов. – М.: Энергия, 1969 г.
4. Ф. Шолле. Глубокое обучение на Python – СПб.: Питер – 2018
5. K. Diederik, B. Jimmy. Adam: A Method for Stochastic Optimization / International Conference on Learning Representations – 2014 г.

УДК 621.396.96

КОНТРОЛЬ ОБМОТОК АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИМИ НАПРЯЖЕНИЯМИ

Зеленко В.В., Суходолов Ю.В.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Одними из основных потребителей электроэнергии, примерно 40% всей производимой электростанциями, являются асинхронные электродвигатели [1], что определяет необходимость повышения их качества. В процессе эксплуатации могут возникать повреждения элементов электродвигателя, что в свою очередь приводит к преждевременному выходу его из строя. До 90 % всех отказов асинхронных электродвигателей со вращающимися обмотками приходится на витковые замыкания [2], другие дефекты являются следствием их развития.

Испытание обмоток асинхронных электродвигателей на витковые замыкания состоит из

двух задач: создание между витками необходимого испытательного напряжения и обнаружение дефектов, приведших к пробое изоляции.

На распределение напряжения вдоль обмотки, контролируемой на витковое замыкание, влияет фронт испытательного сигнала. Контроль импульсами низкого напряжения не обеспечивает полную достоверность при испытаниях, так как при низких напряжениях не пробиваются воздушные промежутки любой толщины, следовательно, дефекты не будут выявлены даже в случаях, когда витковая изоляция полностью разрушена и витки разделяются только воздушным зазором.

Испытания прямоугольными импульсами в большинстве случаев приведут к пробое изоляции исправной обмотки при напряжении, значительно меньшим, чем испытательное, принятое для данного типа обмотки [3].

Для исключения пробоя исправной изоляции необходимо подавать испытательный сигнал с регулируемым фронтом, не допуская превышения скорости его нарастания. Регулируемый фронт можно получить используя квазипериодические напряжения, представляющие собой последовательности радиоимпульсов.

Изменяя частоту заполнения и несущую частоту радиоимпульсов можно получить значительное увеличение межвиткового напряжения без превышения напряжения на корпус, а также управлять параметрами спектров испытательных сигналов и выходного напряжения, снимаемого с контролируемой обмотки.

Одним из основных факторов, влияющих на точность при контроле обмоток электрических машин, являются искажения испытательных сигналов.

В импульсных измерительных системах контроля обмоток электрических машин, используется математический анализ частотных параметров сигнала. Из теории разложения в ряд Фурье следует, что отображение сигнала в частотной области справедливо для стационарного сигнала, который полностью определен на интервале ортогональности, и не зависит от выбранного номера этого интервала на временной оси. Считается, что спектральная характеристика такого сигнала не является функцией времени, и спектр – это совокупность амплитуд и начальных фаз гармонических колебаний различной частоты, составляющих временную функцию. На практике спектральный анализ применяется на конечном интервале времени, при его помощи можно описать не только физические процессы, но и свойства измерительных сигналов и аппаратуры.

При расчете реальных (конечных и нестационарных) сигналов необходимо учитывать изменения параметров тестовых сигналов в системах диагностики обмоток электрических машин, которая обусловлена, прежде всего, нестабильностью работы генераторов испытательных напряжений. Она проявляется в изменении частоты следования и локальных вариациях одного или нескольких участков измерительного сигнала с течением времени. При разработке математических алгоритмов автоматического подавления искажений, обусловленных динамикой параметров сигналов, необходимо определить зависимость между локальными вариациями сигнала и изменениями значений составляющих его спектра.

В процессе исследований было установлено, что изменения значений параметров входных сигналов приводят к нарушению исходного

распределения гармонических спектральных составляющих, при этом, одни из них подвергаются наибольшему изменению, а другие – наименьшему [3]. Повышение точности измерений предлагается обеспечить за счет замены малочувствительной регистрации изменений временных параметров сигналов, регистрацией изменений параметров характерных гармонических составляющих спектра, обладающих максимальной чувствительностью к отклонениям измеряемого параметра и минимальной чувствительностью к отклонениям, обусловленным нестабильностью работы элементов измерительных контуров. Преимуществом при этом обладает математический аппарат, обеспечивающий работу с дискретным спектром сигнала. Так, регулируя амплитуду, период следования, длительность импульсов и время задержки, можно математически обоснованно управлять структурой спектра [3]. Знание номеров характерных гармонических составляющих позволит учесть искажения и неинформативные спектральные составляющие, вызванные нестабильностью работы измерительной аппаратуры.

Определение номеров гармонических составляющих, обладающих минимальной чувствительностью к нестабильности параметров измерительного сигнала, предусматривает исследование динамических особенностей его спектра путем анализа частных производных выражений для расчета амплитуд характерных гармоник [3].

Учитывая, что спектральный анализ в реальности может применяться только на конечных интервалах времени, необходима разработка математического аппарата, который обеспечит единый подход к описанию спектров квазипериодических сигналов. Таким образом, целью исследований являются обеспечение точности и автоматизации измерений за счет замены малочувствительной регистрации изменений временных параметров сигналов, регистрацией изменений параметров характерных гармонических составляющих спектра, обладающих максимальной чувствительностью к отклонениям контролируемого параметра и минимальной чувствительностью к отклонениям, обусловленным нестабильностью работы измерительной аппаратуры. Кроме того, необходимо учесть погрешности, обусловленные конечностью интервалов времени измерений.

Квазипериодические сигналы занимают промежуточное положение между непериодическими и периодическими сигналами и отражают процесс преобразования спектральной плотности в дискретный спектр. Особенностью квазипериодических сигналов является их конечность во времени. Разный подход к описанию спектров периодического и непериодического сигналов создает определенные трудности при рассмот-

рении квазипериодических сигналов. Моделирование процесса формирования дискретного спектра из спектральной плотности предусматривает общее описание обоих типов спектров. Один из путей достижения поставленной цели – рассмотрение процесса формирования дискретного спектра из спектральной плотности при периодизации сигнала. При этом существует несколько подходов к представлению этого процесса. Согласно теореме Котельникова [4] спектр непериодического сигнала можно получить, умножая спектр периодического сигнала на прямоугольную функцию в частотной области. Однако практическая реализация точного преобразования спектральной плотности в дискретный спектр с помощью ряда Котельникова невозможна, так как сигнал с ограниченным спектром – это сигнал, длящийся бесконечно долго. При дискретизации такого сигнала будет получено бесконечное число отсчетов. Для восстановления исходного непрерывного сигнала, а значит, и для получения дискретного спектра этого сигнала, необходимо учесть все отсчеты сигнала, что невозможно ввиду неограниченной его длительности.

Второй подход к решению поставленной задачи заключается в получении периодической последовательности импульсов, представляющей собой сумму одиночных сигналов, одинаково задержанных во времени относительно друг друга [5]. Однако рассмотрение реального сигнала как периодического приведет к ненормируемой погрешности из-за конечности длительности измерительных процессов. Соответственно необходимым является определение влияния погрешности формирования дискретного спектра в зависимости от числа N повторений при периодизации. При периодизации с увеличением числа импульсов в спектральной плотности сигнала образуется все больше нулей [5]. Так как каждый ноль спектральной плотности находится на строго определенной частоте, он является спектральной составляющей дискретного спектра, а сам спектр квазипериодического сигнала можно считать комбинированным, т. е. состоящим из участков спектральной плотности, разделенных спектральными составляющими с нулевой амплитудой. При увеличении числа нулей уменьшается расстояние между ними и увеличивается спектральная плотность в области частот, кратных частоте периодизации, т. е. формируются составляющие будущего дискретного спектра. Таким образом, при периодизации

происходит процесс преобразования спектральной плотности в дискретный спектр.

Представим анализируемый сложный сигнал в виде линейной комбинации заданных функций, ограниченных по времени длительностью рассматриваемого сигнала. Известно, что наиболее удобное и имеющее физический смысл – это разложение сигнала в ряд Фурье [6]. Однако бесконечный гармонический сигнал является математической абстракцией и не может отражать реальный процесс. В частности, такой сигнал нельзя использовать для разложения ограниченного во времени квазипериодического сигнала. При выборе базиса разложения целесообразным представляется максимальное использование преимуществ гармонического сигнала (простое математическое описание; инвариантность к линейным преобразованиям; отработанная техника генерирования гармонических функций [6]) с учетом ограничений, накладываемых практикой. Решение, одновременно удовлетворяющее обоим требованиям, – это применение в качестве базиса гармонических сигналов, ограниченных во времени, часто встречающихся в реальных процессах, например, последовательности радиоимпульсов. Разложение сигнала будет производиться на радиоимпульсы с различной несущей частотой. При этом несущая частота отдельного радиоимпульса будет соответствовать частоте отдельной гармоники спектра периодического (бесконечного во времени) сигнала, разложенного в ряд Фурье. При таком разложении сигнала придется отказаться от спектрального метода анализа в его обычном представлении.

Литература

1. Ермолин Н. П., Жерихин И. П. Надежность электрических машин. – Л. : Энергия, 1976. – 248 с.
2. Антонов, М.В. Эксплуатация и ремонт электрических машин / М.В. Антонов, Н.А. Акимова, Н.Ф. Котеленец. – М. : Высш. шк., 1989. – 192 с.
3. Суходолов Ю. В. Автоматизированная установка для испытания и обнаружения дефектов обмоток электрических машин. М. : Научно-технические достижения. Межотраслевой научно-технический сборник, 1993.
4. Гутников, В. С. Фильтрация измерительных сигналов / В. С. Гутников. Л. : Энергоатомиздат, 1990. – 192 с.
5. Гоноровский, И.С. Радиотехнические цепи и сигналы / И.С. Гоноровский. М. : Дрофа, 2006. – 719 с.
6. Баскаков, С.И. Радиотехнические цепи и сигналы / С.И. Баскаков. М. : Высш. шк., 2000. – 462 с.