

Зависимость спектральных составляющих тока статора от повреждений в электродвигателе

А.В. Мальцев

Кафедра “Автоматизированные
технологические и информационные
системы”

Уфимский государственный нефтяной
технический университет

Филиал в г. Стерлитамаке, Россия

e-mail: mal_192@mail.ru

П.Н. Чариков

Кафедра “Автоматизированные
технологические и информационные
системы”

Уфимский государственный нефтяной
технический университет

Филиал в г. Стерлитамаке, Россия

e-mail: charikovpn@gmail.com

Аннотация¹

Безопасность и безаварийность технологических процессов на производстве во многом зависит от технического состояния машинных агрегатов, выполняющих ключевую роль в производстве. Основным приводным механизмом машинных агрегатов является асинхронный электропривод с короткозамкнутым ротором. Повреждение в любой части электродвигателя приводят к снижению производительности и срока службы машины. Неисправности, возникшие вследствие естественного износа, ошибок при обслуживании и проектировании, вредного воздействия окружающей среды и других факторов, должны быть своевременно выявлены и устранены. В связи с этим анализ состояния электродвигателя и прогнозирование повреждений играет основную роль в увеличении надежности и увеличения срока службы оборудования. В данной статье будут рассмотрены закономерности спектральных составляющих тока статора электродвигателя от характера повреждения.

1. Введение

Трехфазная обмотка статора асинхронного электродвигателя, подключенная к трехфазной сети переменного тока, создает магнитное поле. Магнитное поле, создаваемое в обмотке статора, может быть круговым или эллиптическим. В круговом магнитном поле вектор пространственной магнитной индукции вращается равномерно и описывает окружность, т. е. значение вектора не зависит от пространственного положения и остается неизменным.

Труды Седьмой всероссийской научной конференции "Информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений", 28-30 мая, Уфа-Ставрополь-Ханты-Мансийск, Россия, 2019

Круговое вращающееся поле, создаваемое обмоткой статора, может быть только при условии симметричности векторов магнитной индукции каждой фазы. Соблюдение этого условия достигается тем что все обмотки электрической машины делают одинаковыми, а их оси смещают в пространстве на 120 электрических градусов относительно друг друга и включают в сеть трехфазного симметричного синусоидального напряжения.

При нарушении симметричности векторов магнитной индукции фазных обмоток, вращающееся поле статора становится эллиптическим. В эллиптическом магнитном поле вектор магнитной индукции B вращается не равномерно и изменяется во времени ($\omega \neq \text{const}$), своими концами описывает эллипс. Эллиптическое вращающееся магнитное поле содержит составляющую (обратно вращающуюся), которая больше или меньше основной. Обратное магнитное поле электрической машины ухудшает ее эксплуатационные свойства, это связано с созданием противодействующего (тормозящего) момента. В асинхронном электродвигателе эллиптическое магнитное поле будет возникать при нарушении питающего напряжения (не симметрия в сети трехфазного напряжения), нарушение симметрии обмоток статора (неодинаковое сопротивление обмоток, различное число витков), неправильное подключение электродвигателя (перепутаны начало и концы обмоток), неисправность подшипников, повреждение приводного механизма, несоосность статора и ротора, ротора и приводного механизма.

В результате воздействия эллиптического магнитного поля в воздушном зазоре асинхронной машины создается бесконечный спектр поля, который можно разложить на ряд гармоник. Гармонические составляющие магнитного поля статора индуцируются в его токе.

Анализируя гармоники тока статора можно сделать вывод о характере и развитии повреждения электродвигателя.

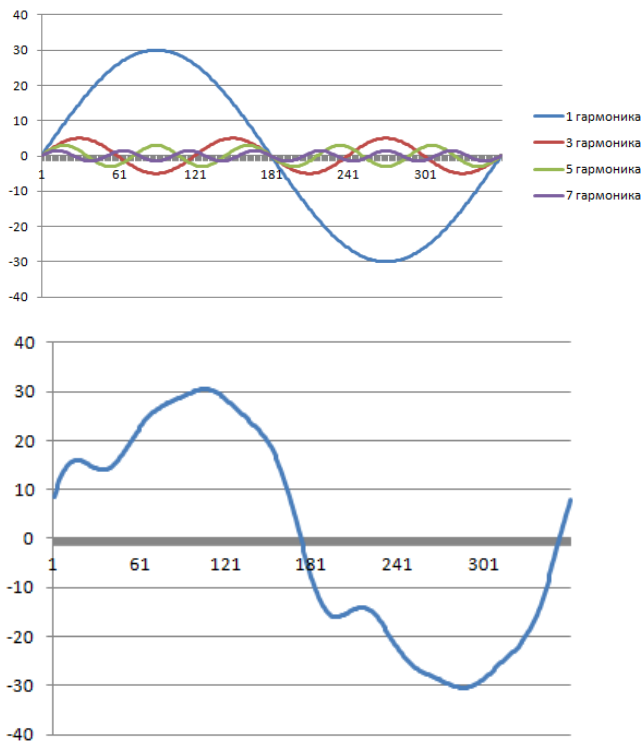


Рис. 1. Изменение формы токового сигнала при воздействии на него 3,5,7 гармоник.

Исследуемые электрические сигналы асинхронного двигателя представляет собой периодический процесс. Токосый сигнал неисправного двигателя, содержащий гармоники, можно представить как сумму N синусоидальных компонентов с различной частотой ω_n и фазовым сдвигом φ_n (1).

$$i = I_{m0} + \sum_{n=1}^N I_n \sin(\omega_n t + \varphi_n) \quad (1)$$

$$\omega_n = 2\pi f n \quad (2)$$

где I_m – амплитуда синусоидального тока (амплитуда – максимальное мгновенное значение тока, которое он достигает).

Мгновенным значением тока называется величина которую он достигает в определенный момент времени t .

ω – угловая частота, $\omega = 2\pi f = 2\pi/T$,

T – период переменного тока (время за которое переменный периодический ток совершает полный цикл своих изменений)

f – частота переменного тока,

φ – начальная фаза переменного синусоидального тока (фаза тока в момент времени $t=0$)

Угловая частота каждого компонента в n раз больше основной частоты первой гармоники.

При спектральном анализе периодических функций используют разложение интегралом Фурье. Полученный при разложении спектр является основной характеристикой частотной области.

Спектр позволяет определить частотную область, в которой располагается сигнал. Математически спектральный анализ представляет разложение исследуемого сигнала по тригонометрическим функциям – синусам и косинусам. Набор гармонических колебаний образует спектр сигнала.

Наглядное представление о сигнале можно увидеть из его спектральной диаграммы, их различают на амплитудные рис 2, а (частота – амплитуда) и фазные рис 2, б (частота – фаза). Спектр сигнала делится на амплитудный (множество амплитуд гармоники) и фазный (множество фаз гармоники).

Значение гармоник, появившихся в электродвигателе, зависит не только от возникшего повреждения, но и от параметров электродвигателя и приводного механизма. Для более точной диагностики необходимо учитывать такие параметры электропривода: номинальное напряжение, скорость вращения, мощность электродвигателя, тип подшипника и сведения о приводном механизме (тип передачи ременная или зубчатая).

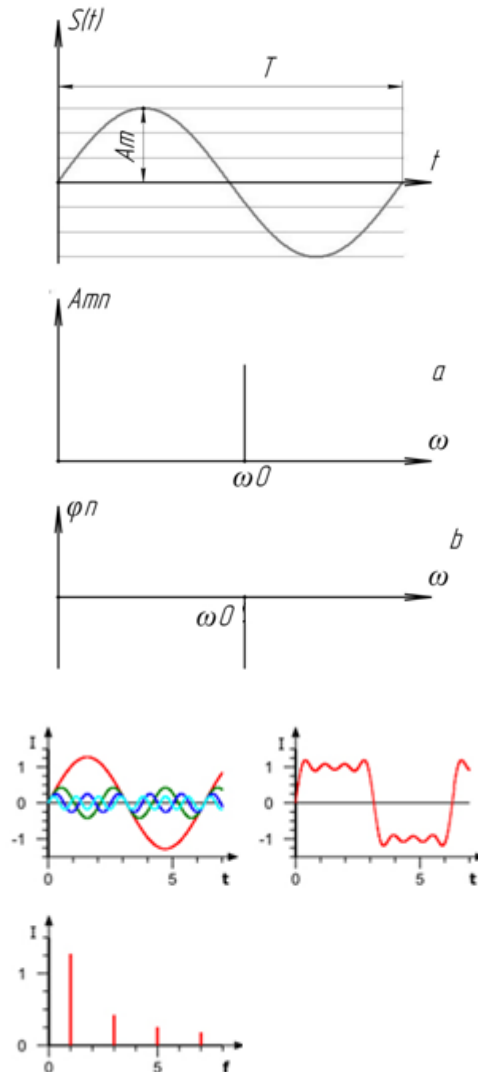


Рис. 2. Спектральные диаграммы

По значениям спектров сигналов можно судить о состоянии электрической машины.

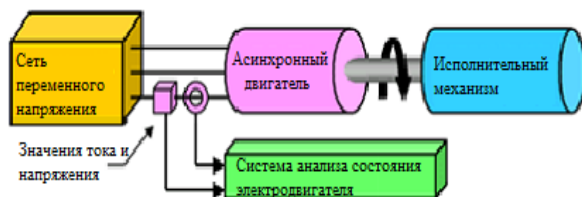


Рис. 3. Система контроля состояния электродвигателя

2. Возможные дефекты

2.1 Повреждение обмоток ротора

Нарушение равномерности воздушного зазора между статором и ротором. Расхождение воздушного зазора может быть статическим и динамическим. При статическом нарушении воздушного зазора минимальное радиальное положение фиксировано в пространстве. При динамическом нарушении воздушного зазора минимальное радиальное положение вращается с ротором. Возможные причины: конусный диаметр ротора, изгиб ротора вследствие термических или механических воздействий, разрушение подшипников, дисбаланс нагрузки и ротора.

2.2 Подшипники

Анализ состояния подшипников является наиболее важной задачей, поскольку более 40% всех сбоев в электродвигателе приходится на разрушения подшипников. Сбои в подшипнике характеризуются значительным частотным диапазоном.

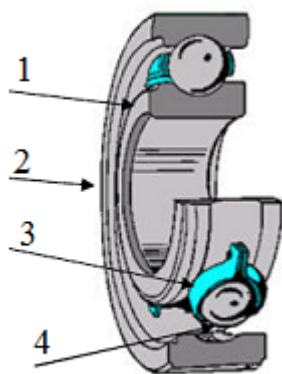


Рис. 4. Конструкция подшипника

Подшипники качения состоят из неподвижного наружного кольца 2, которое находится внутри корпуса машины и является стационарным; внутреннего кольца 1, которое прилегает к валу и вращается вместе с ним; сепаратора 3, удерживающего элементы качения и элементов качения 4, которые представляют собой ролики

обеспечивающие качение между внутренним и наружным кольцом.

Анализируя гармоники питающего двигателя тока можно выделить следующие значения частот от повреждения и геометрии подшипника.

$$f_{ЭК} = \frac{n}{2} \cdot f_r \cdot \left(1 - \frac{BD}{PD} \cdot \cos \beta\right) \quad (3)$$

$$f_{БК} = \frac{n}{2} \cdot f_r \cdot \left(1 + \frac{BD}{PD} \cdot \cos \beta\right) \quad (4)$$

$$f_{НК} = \frac{PD}{BD} \cdot f_r \cdot \left(1 - \left(\frac{BD}{PD} \cdot \cos \beta\right)^2\right) \quad (5)$$

$$f_{РС} = \frac{1}{2} \cdot f_r \cdot \left(1 - \frac{BD}{PD} \cdot \cos \beta\right) \quad (6)$$

где $f_{ЭК}$ – частота дефекта вызванного разрушением элементов качения.

$f_{БК}$ – характеризует разрушение внутреннего кольца

$f_{НК}$ – характеризует разрушение наружного кольца

$f_{РС}$ – частота вызванная разрушением сепаратора

PD – диаметр шага подшипника

BD – диаметр шарикоподшипника

n – число катящихся элементов

f_r – скорость вращения

β – угол конусности отверстия внутреннего кольца

Расчетные значения частот являются приближенными и расходятся и действительными на 10 – 15%.

3. Характеристики дефекта приводного механизма

Дефекты электропривода, связанные с исполнительным механизмом можно разделить на две категории: это дефекты отказа нагрузки и дефекты отказа передачи. Все полученные заключения были смоделированы в лабораторных условиях, проверены на промышленных агрегатах.

3.1 Шкивы

Основные проблемы связанные со шкивами связаны нарушением симметрии между шкивом двигателя и шкивом приводного механизма. Частоты, на которых проявляется дефект, зависят от частоты вращения приводного механизма и от диаметра шкивов (7).

$$f_{ш} = \frac{D_d \cdot f_r}{D_n} \quad (7)$$

где $f_{ш}$ – частота характеризующая нагрузку шкива

f_r – частота вращения

D_d – диаметр шкива двигателя

D_n – диаметр шкива нагрузки

Гармоническая составляющая, указывающая на дефект шкива находится в частотном диапазоне от $f_1 \pm f_{ш}$, где f_1 частота питания двигателя.

3.2 Ременные передачи

Для диагностики нарушений ременных передач необходимо рассчитать частоту проявления дефекта ремня (8).

$$f_p = \frac{D_d \cdot \pi \cdot f_r}{L_p} \quad (8)$$

где f_p – частота характеризующая дефект ременной передачи.

f_r – частота вращения

D_d – диаметр шкива двигателя

L_p – диаметр ремня

Основные дефекты связанные с ременной передачей являются обрыв ремня, ослабление натяжки ремня, слишком сильная натяжка. Гармоническая составляющая, указывающая на проблемы с ременной передачей находится в частотном диапазоне от $f_1 \pm f_p$, где f_1 частота питания двигателя. Так же на этих частотах отображаются дефекты исполнительного механизма ременных передач только с наибольшей амплитудой.

3.3 Дефекты в редукторе

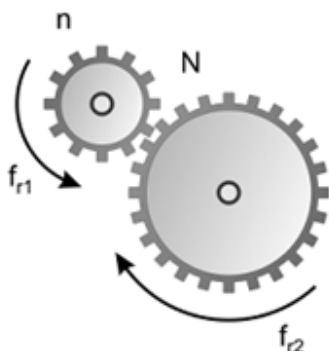


Рис. 5. Схематическое представление редуктора

Нарушения в работе редуктора наблюдаются в двух областях частот. Эти частоты связаны с преобразованием скорости. Гармонические составляющие, указывающие на дефект редуктора находятся в частотных диапазонах $f_1 \pm f_{r1}$ и $f_1 \pm f_{r2}$, где f_1 частота питания двигателя. Значение f_{r1} частота вращения до преобразования скорости и f_{r2} частота вращения после преобразования скорости. Эти значения характеризуют повреждения в передаче (слом зуба). Второй частотный диапазон f_g , указывающий на нарушение в редукторе, зависит от частоты вращения вала и числа зубьев шестерни (9).

$$f_g = n \cdot f_{r1} = N \cdot f_{r2} \quad (9)$$

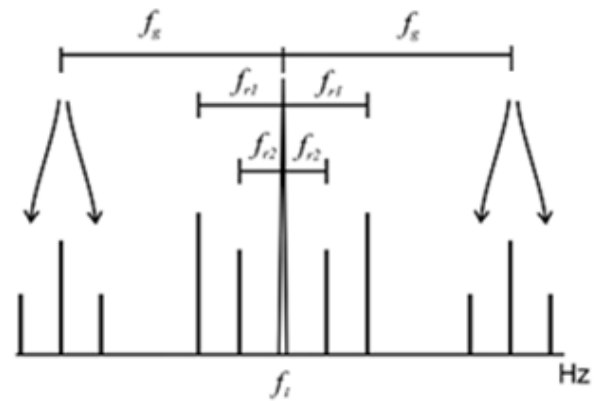


Рис. 6. Схема дефектов редуктора

Амплитудные значения дефекта чувствительны к изменениям нагрузки. При резком изменении нагрузки могут возникать амплитудные скачки без наличия дефекта, поэтому для анализа неисправности необходимо производить измерения при одинаковых условиях.

3.4 Дефекты центробежного насоса

Основными частотными характеристиками свидетельствующими о неисправности центробежных насосов является частота вращения насоса f_n и частота пропускания лопастей $f_{лн}$ (10).

$$f_{лн} = n \cdot f_n \quad (10)$$

где n – количество лопастей насоса.

Амплитуда частот вращения насоса f_n свидетельствует о нарушении соосности между двигателем и рабочим колесом насоса (перекос или дисбаланс). Составляющая $f_{лн}$ указывает на износ лопастей рабочего колеса насоса.

3.5 Повреждения вентиляторов

Так же как и в центробежных насосах, основными частотными характеристиками, свидетельствующими о неисправности вентиляторов является частота вращения f_v и частота прохождения лопастей $f_{лв}$ (11).

$$f_{лв} = n \cdot f_v \quad (11)$$

где n – количество лопастей вентилятора.

Амплитуда частот вращения вентилятора f_v свидетельствует о нарушении соосности между двигателем и вентилятором (перекос или дисбаланс). Составляющая $f_{лв}$ указывает на износ лопастей.

4. Заключение

Диагностика состояния электропривода ответственных механизмов является актуальной задачей. Выход из строя электропривода может привлечь к аварийным ситуациям, нанести вред здоровью персонала, привести к значительным материальным потерям. Применение алгоритмов прогнозирования отказа электропривода позволяет более грамотно составлять графики планово-предупредительных ремонтов и упорядочить систему

закупа оборудования в резерв. Рассмотренные выше алгоритмы показывают, что по токовым гармоникам можно судить не только о состоянии электродвигателя, но и приводных механизмов. Применение систем искусственного интеллекта позволяет создавать экспертные системы контроля состояния электропривода.

Список используемых источников

1. Кацман М. М. Электрические машины : учебник для студ. учреждений сред. проф. образования / М.М. Кацман. — 12-е изд., стер. — М. : Издательский центр «Академия», 2013. — 496 с.
2. Прахов, И.В. Влияние режимов работы и характерных повреждений насосно-компрессорного оборудования с электрическим приводом на генерирование высших гармонических составляющих токов и напряжений / И.В. Прахов, М.Г. Баширов // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. — М.: Издво НПП КАТС, 2010. — №4. — С. 18-21
3. Ратхор, Т.С. Цифровые измерения. Методы и схемотехника. — М.: Техносфера, 2004. — 376 с.
4. Солонина А., Улахович Д., Яковлев Л. Алгоритмы и процессоры цифровой обработки сигналов. — СПб., «БЧВ-Петербург», 2002.
5. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. - СПб, Питер, 2007
6. Penrose, Dr. Howard W. Practical Motor Current Signature Analysis Taking the Mystery Out of MCSA. s.l. : ALL-TEST Pro.
7. Borges da Silva, L.E., Lambert-Torres, G., Santos, D.E., Bonaldi, E.L., de Oliveira, L.E.L. & Borges da Silva, J.G. (2009). An Application of MSCA on Predictive Maintenance of TermoPE's Induction Motors, Revista Ciências Exatas, Vol. 15, No. 2, (July 2009), pp. 100-108, ISSN 1516-2893.
8. T. G. Amaral, V. F. Pires, J. F. Martins, A. J. Pires and M. M. Crisóstomo, Image Processing based Classifier for Detection and Diagnosis of Induction Motor Stator Fault, in "Image Processing", book edited by Yung-Sheng Chen, December 1, 2009
9. Shahin Heydayti Kia, Humberto Henao, Gérard-André. Torsional Vibration Assessment Using Induction Machine Electromagnetic Torque Estimation. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 57, No.1. January 2010, p. 11.
10. Bonaldi, E.L., de Oliveira, L.E.L., Lambert-Torres, G. & Borges da Silva, L.E. (2007).
11. H.L. Poon, Verbal time series reports generation in condition monitoring, Computers in Industry, vol.15, 1990, pp. 293-301.
12. Burr, D. J. 1987. Experiments with a connectionist text reader. In Proceedings of the First International on Neural Networks, eds. M. Caudill and C. Butler, vol. 4, pp.717-24. San Diego, CA: SOS Printing.

VII Всероссийская научная конференция "Информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений", Уфа-Ставрополь-Ханты-Мансийск, Россия, 2019