

УДК 621.313

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ КРЕПЛЕНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Г. О. Гаврилец

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: galgv@bk.ru

Рассматривается методика определения параметров крепления асинхронного двигателя на жестком основании. Методика основана на определении и анализе электромагнитного момента как возмущающей вибрационной силы, измерении и анализе виброскорости, применении метода электромеханических аналогий для составления идентификационной модели и энергетического метода для определения численных значений коэффициентов жесткости и демпфирования крепления.

Ключевые слова: вибрация, асинхронный двигатель, электромагнитный момент, координатные преобразования, ряд Фурье, мгновенная мощность.

МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ КРІПЛЕННЯ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

Г. О. Гаврилець

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: galgv@bk.ru

Розглядається методика визначення параметрів кріплення асинхронного двигуна на жорсткій основі. Методу засновано на визначенні та аналізі електромагнітного моменту та сили, що породжує вібрацію, вимірюванні та аналізі віброшвидкості, застосуванні методу електромеханічних аналогій для складання ідентифікаційної моделі та енергетичного методу для визначення чисельних значень коефіцієнтів жорсткості й демпфірування кріплення.

Ключові слова: вібрація, асинхронний двигун, електромагнітний момент, координатні перетворення, ряд Фур'є, миттєва потужність.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Современные технологии вибродиагностики позволяют на ранних стадиях выявить различные дефекты асинхронных двигателей (АД). Как правило, они предусматривают использование измерительно-диагностических комплексов со специальным программным обеспечением, базой данных неисправностей и возможностью получения отчета о текущем и прогнозируемом техническом состоянии двигателя [1]. Механические ослабления креплений АД к его основанию или фундаментной плите, как правило, не диагностируются. Это связано с тем, что данный дефект не относится непосредственно к двигателю, однако значительно влияет на его работу. Проверка качества креплений производится только при текущих ремонтных работах согласно графику планово-предупредительных ремонтов (ППР) [2].

Учитывая изложенное выше, актуальной и требующей решения задачей является диагностика механических ослаблений в креплениях АД и оценка их влияния на процессы электромеханического преобразования энергии.

Целью работы является разработка методики определения параметров крепления асинхронного двигателя на жестком основании.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Механические ослабления в АД могут возникать в вертикальном, горизонтальном или осевом направлениях по различным причинам: вследствие износа оборудования или дефектов изготовления, монтажа и эксплуатации, например, из-за слишком свободных посадок деталей, увеличенных зазоров, трещин и дефектов конструкции. При этом во время работы машины могут возникать соударения деталей, которые имеют случайный характер и вносят во временной вибрационный сигнал значительную неста-

ционарную составляющую. Диагностирование механических ослаблений креплений, как и многих других дефектов АД, целесообразно проводить с использованием методов вибрационного анализа.

При наличии механических ослаблений креплений в вибрационном сигнале присутствует большое число нестационарных контактов, во временной области это выражается наличием значительной нестационарной составляющей, а на спектре – значительным количеством гармоник оборотной частоты ротора. Как правило, вибрационная мощность сосредоточена в одной или нескольких гармониках, частоты которых и необходимо определять. Остальные гармоники монотонно убывают.

Таким образом, задача определения диагностической информации сводится к обнаружению частот, на которых происходит максимум механических контактов в системе и наблюдается максимум вибрационной мощности. При этом измерение вибропараметров следует проводить на заведомо известных участках тахограммы электропривода – при включении и отключении двигателя от сети, что позволит также оценить влияние изменяющихся характеристик двигателя в процессе эксплуатации.

Для построения диагностической модели важно понимание природы возникающих вибрационных процессов. Ранее были изучены вопросы вибрационной связи между узлами асинхронного двигателя [3], процессы возбуждения вибраций в подшипниках качения, разработана математическая модель колебаний АД, закрепленного в четырех точках на фундаментном основании [3]. Частично затронут вопрос об определении динамических сил, порождающих колебания двигателя [4].

В общем случае методика определения парамет-

ров крепления асинхронного двигателя состоит из следующих действий:

- подключение к сети асинхронного двигателя;
- измерение вибрации в двух плоскостях;
- определение момента двигателя при пуске;
- определение положения в пространстве возмущающей силы, действующей на двигатель;
- координатные преобразования возмущающей силы и определение ее проекции на горизонтальную и вертикальную плоскости;
- определение гармонических составляющих момента двигателя на интервале увеличения его до максимума при пуске;
- формирование системы уравнений энергетического баланса для гармоник мощности вибрационного фона двигателя и механической части системы;
- определение параметров крепления двигателя путем решения системы идентификационных уравнений энергетического баланса.

Реализация предложенной методики иллюстрируется рис. 1, где АД – асинхронный двигатель, жестко закрепленный на фундаменте анкерными болтами; БДН – блок датчиков напряжения; К – управляемый коммутатор силовой цепи; БДВ – блок датчиков вибрации; БОМ – блок определения момента; БАВ – блок анализа вибропараметров; БАМ – блок анализа электромагнитного момента; БОФ – блок определения фазы включения двигателя; БКП – блок координатных преобразований; БОП – блок определения параметров крепления асинхронного двигателя.

Для испытуемого двигателя реализуются такие режимы работы: прямой пуск, работа на холостом ходу, самоторможение. Датчики напряжения типовые, трансформаторные, рассчитанные на напряжение $U_{max} = 1,2 U_n$, где U_n – номинальное напряжение двигателя. В качестве датчиков вибрации используются акселерометры с рабочей частотой до 4800 Гц. Сигнал электромагнитного момента рассчитывается на основании паспортных данных двигателя или определяется путем моделирования. Блок анализа вибропараметров представляет собой математический аппарат, реализующий функции интегрирования виброускорения, фильтрации и спектрального анализа. Блок анализа электромагнитного момента представляет собой математический аппарат разложения в ряд Фурье неперiodического сигнала и выделения необходимого количества гармоник для анализа. Блок определения фазы включения двигателя позволяет идентифицировать первоначальное направление вибрационной силы в момент пуска. Блок координатных преобразований предназначен для определения радиальных и осевой составляющих вибрационной силы, что необходимо для идентификации параметров крепления в трех взаимно перпендикулярных направлениях. Блок определения параметров крепления асинхронного двигателя представляет собой математический аппарат, выполняющий функции расчета параметров имитационной модели узла крепления, составления

и решения системы идентификационных уравнений, принятия решения о наличии или отсутствии дефекта крепления. Блок управления реализует функции программы управления верхнего уровня.

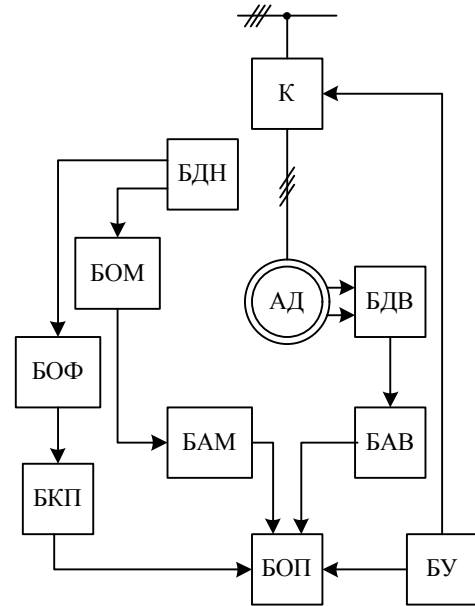


Рисунок 1 – Структура системы определения параметров крепления

Электромагнитный момент, который по своей природе является моментом сил, порождающих вибрацию, рассчитывается на основе паспортных данных двигателя [5]:

$$M = \frac{M_p}{\cos \varphi_k} \left(\cos(\omega t - \varphi_k) e^{\alpha_1 t} + \cos(\omega t + \varphi_k) e^{\alpha_2 t} \right), \quad (1)$$

где M_p – пусковой момент двигателя, определяемый

формулой Клосса; $\alpha_1 = \frac{R_1 R_2}{L_m (R_1 + R_2)}$;

$\alpha_2 = \frac{R_1 R_2}{L_1 + L_2}$; R_1, R_2 – активные сопротивления

статора и ротора; L_1, L_2, L_m – индуктивности двигателя; φ_k – угол сдвига между напряжением и током при подключении двигателя к сети.

В трехфазном асинхронном двигателе направление вектора момента электромагнитных сил определяется суммарным электромагнитным полем, создаваемым протекающими в обмотках токами. Как известно, фазовые обмотки статора смещены относительно друг друга на 120 электрических градусов (рис. 2).

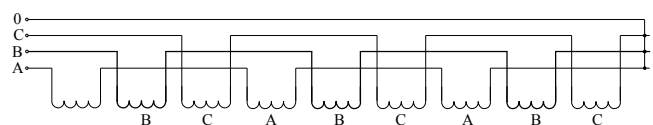


Рисунок 2 – Соединение обмоток в трехфазном асинхронном двигателе
Соответственно и токи, протекающие в обмотках

A, B, C, сдвинуты на 1/3 периода. Суммарное электромагнитное поле равно сумме полей, создаваемых токами в каждой из фаз, а его направление определяется суммой векторов этих полей.

В каждый момент времени электромагнитный момент представляется вектором, приложенным к ротору двигателя перпендикулярно к оси вращения в точке, где электромагнитное поле максимально. Вместе с электромагнитным полем вектор момента вращается, переходя из одной фазы в другую (рис. 3).

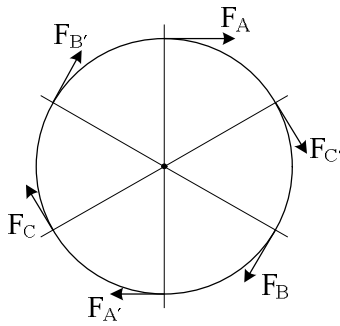


Рисунок 3 – Изменение направления вектора начальной силы при включении АД в разные моменты времени

Таким образом, для двигателя с двумя парами полюсов можно определить восемь положений вектора электромагнитного момента, соответствующих максимальным и минимальным значениям поля в каждой фазовой обмотке.

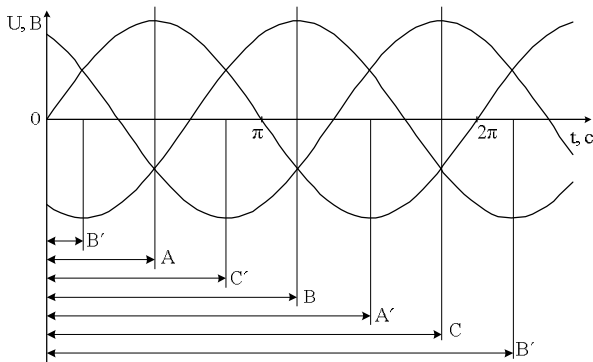


Рисунок 4 – Фиксированные значения вектора электромагнитного момента

На рис. 5 представлено разложение мгновенного вектора вибросилы F_{Σ} на радиальную в вертикальной плоскости силу F_a и радиальную в горизонтальной плоскости силу F_b :

$$F_a = F_{\Sigma} \cos(\varphi); \quad (2)$$

$$F_b = F_{\Sigma} \cos(90 - \varphi). \quad (3)$$

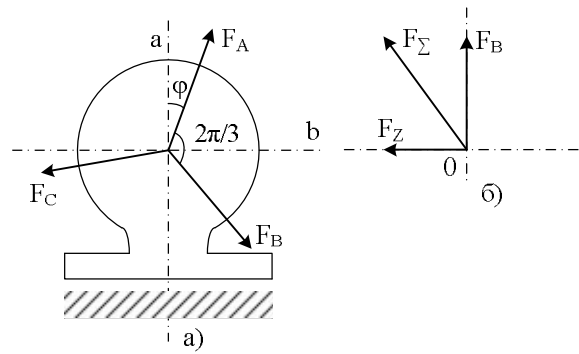


Рисунок 5 – Разложение мгновенного вектора вибросилы на составляющие

Ударное воздействие электромагнитного момента на конструкцию происходит при пуске, когда его величина возрастает от нуля до M_{max} за время t_e (рис. 6,а). Для разложения в ряд Фурье этот участок сигнала представляется периодической функцией (рис. 6,б), а разложение производится на половине периода $\frac{T_x}{2}$.

$$f(x) = \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(nx), \quad (4)$$

где

$$b_n = \frac{4}{T_x} \int_0^{\frac{T_x}{2}} f(x) \sin(nx) dx. \quad (5)$$

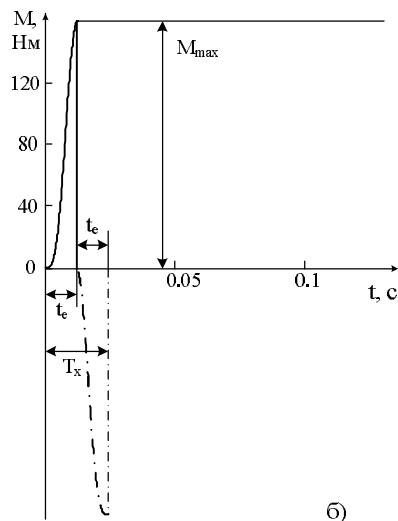
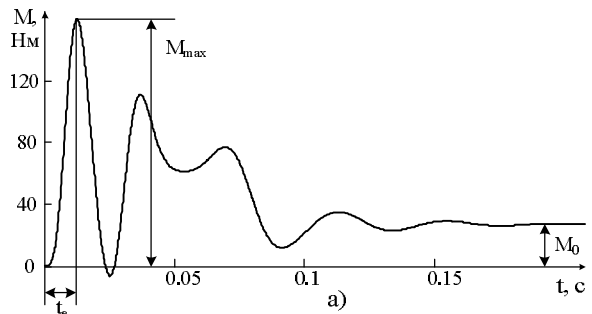


Рисунок 6 – Кривая электромагнитного момента (а) и ее разложение в ряд Фурье (б)

За это же время t_e регистрируется сигнал виброускорения, интегрируется и аналогичным образом раскладывается в ряд Фурье на заданном полупериоде.

Полученные данные передаются в блок определения параметров крепления асинхронного двигателя.

На основании прикладной теории колебаний и электромеханических аналогий [6] асинхронный двигатель рассматривается как механическая колебательная система, состоящая из массы, закрепленной на жесткой поверхности в одной точке с жесткостью c . Свойства материала крепления поглощают колебания характеризуются коэффициентом b (рис. 7,а).

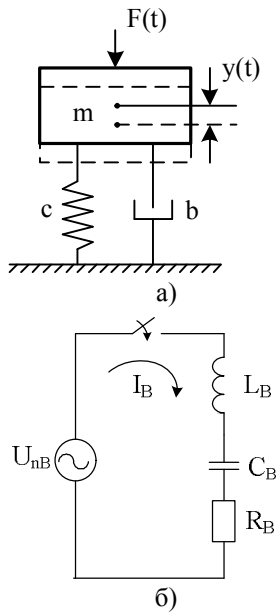


Рисунок 7 – Механическая колебательная система опоры (а) и ее электрический аналог (б)

Такая система может быть описана дифференциальным уравнением второго порядка:

$$m \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + b \frac{dy(t)}{dt} + cy(t) = F(t), \quad (6)$$

где m – масса механизма; c – суммарная жесткость виброизоляторов; b – механическое сопротивление, определяющее активные потери колебательной энергии; $y(t)$ – смещение инерционного элемента от

положения равновесия; $m \frac{d^2 y(t)}{dt^2}$ – инерционные

силы; $b \frac{dy(t)}{dt}$ – силы трения; $cy(t)$ – силы упругости; $F(t) = F_0 \cos(\omega t)$ – сила, порождающая колебания.

Данный процесс в точности описывается дифференциальным уравнением электромагнитных колебаний, возникающих в RLC-цепи (рис. 7,б):

$$L \frac{d^2 i(t)}{dt^2} + R \frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{C} i(t) = u(t), \quad (7)$$

где $L \frac{d^2 i(t)}{dt^2}$ – падение напряжения на концах катушки индуктивности;

$R \frac{di(t)}{dt}$ – падение напряжения на сопротивлении;

$\frac{1}{C} i(t)$ – падение напряжения на конденсаторе.

Электрическая цепь (рис. 7) является схемой замещения механической системы крепления АД к фундаменту. Согласно теории электромеханических аналогий, инерционность механической колебательной системы соответствует индуктивности цепи, жесткость виброизоляторов обратно пропорциональна емкости цепи, механическое сопротивление соответствует активному сопротивлению цепи, вынуждающая сила – э.д.с. цепи, смещению инерционного элемента от положения равновесия соответствует количество электричества, а виброскорости – электрический ток.

Таким образом, задача определения параметров крепления сводится к определению параметров замещающей электрической цепи, в которой источником э.д.с. будет электромагнитный момент двигателя, а контурным током – сигнал виброскорости.

Предложенный способ определения параметров крепления реализуется путем использования уравнений энергетического баланса составляющих мгновенной мощности для элементов RLC-цепи [8].

Уравнения энергетического баланса составляются по схеме замещения механической системы с использованием конечного числа гармоник. При использовании N гармоник тока и напряжения могут быть получены $2N+1$ идентификационных уравнений.

Для задачи определения трех неизвестных параметров достаточным является использование двух гармоник тока или момента. Уравнения баланса мгновенной мощности имеют вид:

$$\begin{cases} P_{0u} = P_{0R}; \\ P_{kan} = P_{kaR} + P_{kaL} + P_{kaC}; \\ P_{kbn} = P_{kbR} + P_{kbL} + P_{kbC}. \end{cases} \quad (8)$$

При этом сигналы напряжения и тока:

$$u(t) = U_1 \cos(\omega_1 t) + U_2 \cos(\omega_2 t); \quad (9)$$

$$\begin{aligned} i(t) &= I_1 \cos(\omega_1 t - \varphi_1) + I_2 \cos(\omega_2 t - \varphi_2) = \\ &= I_{a1} \cos(\omega_1 t) + I_{b1} \sin(\omega_1 t) + \\ &+ I_{a2} \cos(\omega_2 t) + I_{b2} \sin(\omega_2 t). \end{aligned} \quad (10)$$

Выражения для мгновенной мощности на источнике напряжения и элементах цепи определяются таким образом:

$$P_u = u(t)i(t); \quad (11)$$

$$P_R = i^2(t)R; \quad (12)$$

$$P_L = Li(t) \frac{di(t)}{dt}; \quad (13)$$

$$P_C = \frac{1}{C} i(t) \int i(t) dt. \quad (14)$$

ВЫВОДЫ. Предложена методика определения параметров крепления асинхронного двигателя на жестком основании, базирующаяся на использовании уравнений энергобаланса составляющих мгновенной мощности электромеханической системы двигатель–анализируемая опора.

Установлено, что режим вертикальных и горизонтальных виброперемещений может быть оценен с учетом момента включения двигателя, т.е. направления мгновенно приложенной силы, зависящего от комбинации обмоток, подключаемого с помощью контактной аппаратуры двигателя.

Для получения конкретных результатов развитие работы следует вести в направлении создания универсальной модели креплений с одинаковыми параметрами всех четырех опор, с разными параметрами двух боковых опор или двух опор в радиальном направлении, с разными параметрами всех опор.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гольдин А.С. Вибрация роторных машин. – М.: Машиностроение, 1999. – 344 с.
2. Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения: ГОСТ 18322-78 (СТ СЭВ 5151-85). – Госстандарт СССР.

THE METHOD OF CALCULATING MOUNTING ASYNCHRONOUS MOTOR

G. Gavrilets

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University
ul. Pervomayskaya, 20, Kremenchug, 39600, Ukraine. E-mail: galgv@bk.ru

The technique of determining the parameters of an induction motor mount on a rigid base. The technique is based on identifying and analyzing the electromagnetic moment of the perturbing vibrational force, vibration measurement and analysis, application of the method of electromechanical analogies to produce identification model and the energy method for determining the numerical values of the coefficients of stiffness and damping mounts.

Key words: vibration, asynchronous motor, electromagnetic torque, coordinate transformations, Fourier series, the instantaneous power

REFERENCES

1. Goldin A.S. *Vibration of rotary machines*. – M.: Mashinostroenie, 1999. – 344 p. [in Russian]
2. *System maintenance and repair of equipment. Terms and definitions*. GOST 18322-78 (ST SEV 5151–85). – Gosstandart of the USSR. – M.: Izdatelstvo standartov, 1991. – 11 p. [in Russian]
3. Gavrilets G.O. Mathematical model of electric motors fluctuations on the foundation ground // *Bulletin of the Kremenchuk Michaylo Ostrohradskyi State University*. – Kremenchuk: KDU, 2010. – Iss. 4/2010 (63). – PP. 147–149. [in Ukrainian]
4. Gavrilets G.O., Rodkin D.J. Decomposition vibration signals in electromechanical equipment and systems // *Problems of Energy and Resource Saving in Electrical Systems. Science, Education and Practice. Scientific publication*. – Kremenchuk: KNU, 2011. – Iss. 1 (1). – PP. 64–65. [in Ukrainian]
5. Petrov I.I., Meistel A.M. *Special modes of induction motor*. – M.: Energiya, 1968. – 264 p. [in Russian]
6. Jablonskiy A.A., Noreiko S.S. *Course in the theory of oscillations: Textbook for students of technical colleges*. – M.: Energiya, 1968. – 264 p. [in Russian]
7. Romashihin U.V., Rodkin D.J., Kalinov A.P. The energy method of parameter identification asynchronous motors // *Bulletin of the Kremenchuk Michaylo Ostrohradskyi State Politechnical University*. – Kremenchuk: KDPU, 2007. – Iss. 3/2007 (44). – PP. 130–136. [in Russian]

Стаття надійшла 18.07.2012.

Рекомендовано до друку
д.т.н., проф. Родькіним Д.Й.