

ОБОСНОВАНИЕ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В ЗАДАЧАХ ИДЕНТИФИКАЦИИ ИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ

*Ромашихин Ю.В., ассист., Родькин Д.И., д.т.н., проф.
Кременчугский государственный политехнический университет
имени Михаила Остроградского
39600, г. Кременчуг, ул. Первомайская, 20
E-mail: saue@polytech.poltava.ua*

Введение. Существуют различные методы определения электромагнитных параметров асинхронных двигателей [4, 9]. Электромагнитными параметрами при анализе Т-образной схемы замещения являются: активное сопротивление R_1 и индуктивность L_1 статора, активное сопротивление R_2' и индуктивность L_2' ротора, активное сопротивление R_μ и индуктивность L_μ цепи намагничивания. С их помощью рассчитываются характеристики асинхронного двигателя (механические, электромеханические), а также потери в электрической машине. На расчетные потери существенное влияние оказывают параметры цепи намагничивания. Погрешности определения электромагнитных параметров приводят к ошибке определения потерь и характеристик асинхронного двигателя, а соответственно и расчетного срока службы электрической машины.

Методы определения электромагнитных параметров асинхронного двигателя можно условно разделить на три группы:

– прямые методы (к ним относят методы, в которых для определения электромагнитных параметров необходимо проведение опытов холостого хода и короткого замыкания, частичной или полной разборки электродвигателя, получение частотных характеристик и т.д.);

– методы определения электромагнитных параметров, основанные на сравнении кривых тока и скорости, полученных с исследуемого асинхронного двигателя и с его математической модели (при этом необходимо измерять токи, напряжения и скорость асинхронного двигателя во время пуска; при моделировании электрической машины проводится поиск таких ее параметров, при которых пусковые переходные процессы, снятые экспериментально и полученные при помощи моделирования, совпадают);

– методы определения параметров АД с использованием схемы замещения (на одну из обмоток статора подается полигармоническое напряжение и измеряются токи и напряжения статора; полученные кривые Фурье-преобразования представляются гармоническими рядами, определяются составляющие мгновенной мощности для различных гармоник и рассчитываются параметры схем замещения с использованием уравнений баланса напряжений или мощностей).

Весь объем испытаний следует разделять

отдельно для новых машин, которые только выпущены заводом-изготовителем, и для тех машин, которые прошли эксплуатационный цикл и ремонт. Испытания электрических машин в условиях заводов-изготовителей могут содержать не полный объем операций, т.к. электродвигатели в большинстве своем имеют номинальные параметры. Для электроремонтных предприятий должен проводиться весь комплекс испытаний, предусмотренных стандартами, которые могут быть расширены дополнительными испытаниями для идентификации электромагнитных параметров с учетом различных дефектов и неисправностей.

Цель работы. Определение схем замещения асинхронного двигателя для учета дефектов и неисправностей при идентификации электромагнитных параметров.

Материал и результаты исследований. На современном этапе развития широкое распространение получили методы идентификации параметров асинхронных двигателей, в основе которых лежит использование математических моделей. При составлении математического аппарата необходимо использовать схему замещения, которая описывает процессы в электрической машине. Привязка к заранее известной схеме замещения недопустима, т.к. она позволяет анализировать только определенные процессы, протекающие в асинхронном двигателе. Это влечет появление погрешности определения электромагнитных параметров и связано с тем, что схема замещения предусматривает учет определенных свойств и процессов, протекающих в асинхронном двигателе, и не применима для учета изменившихся параметров и факторов. Анализ показывает, что необходимо использовать различные, а не заранее известные, схемы замещения. Путем введения в схему замещения асинхронного двигателя дополнительных нелинейностей и контуров можно учесть дефекты и неисправности, которые возникают в электрической машине. Схема замещения может быть как однофазная, так и трехфазная с учетом механической части электрической машины. Рассмотрение энергопроцессов в трехфазном асинхронном двигателе проводится с использованием схемы замещения. Для рассмотрения можно принять Т-образную схему замещения, которая содержит статорную, роторную цепи и цепь намагничивания. Т-образная схема замещения приведена на рис. 1.

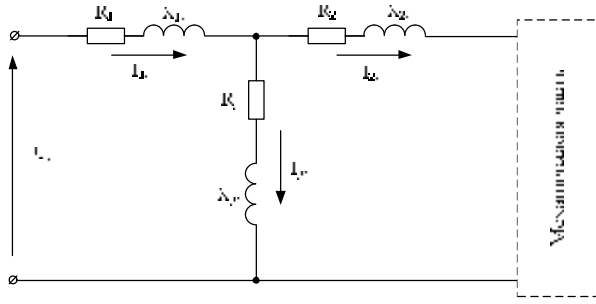


Рисунок 1 – Т-образная схема замещения асинхронного двигателя

На рис. 1 приняты следующие обозначения: R_1 – активное сопротивление статорной цепи; X_1 – индуктивное сопротивление статорной цепи; R_m – активное сопротивление цепи намагничивания; X_m – индуктивное сопротивление цепи намагничивания; R_2 – активное сопротивление роторной цепи; X_2 – индуктивное сопротивление роторной цепи; U_n – напряжение, подводимое к асинхронному двигателю; I_m – ток статорной цепи; I_{mm} – ток цепи намагничивания; I_{2n} – ток роторной цепи; n – относительная частота.

При анализе процессов в трехфазном асинхронном двигателе следует рассмотреть мощность на элементах схемы замещения для каждой из фаз с общей механической частью [1].

Электрическая мощность применительно для Т-образной схемы замещения:

$$P_{y\dot{e}A}(t) = P_{R_1A}(t) + P_{X_1A}(t) + P_{R_mA}(t) + P_{X_mA}(t) + P_{R_2A}(t) + P_{X_2A}(t); \quad (1)$$

$$P_{y\dot{e}B}(t) = P_{R_1B}(t) + P_{X_1B}(t) + P_{R_mB}(t) + P_{X_mB}(t) + P_{R_2B}(t) + P_{X_2B}(t);$$

$$P_{y\dot{e}C}(t) = P_{R_1C}(t) + P_{X_1C}(t) + P_{R_mC}(t) + P_{X_mC}(t) + P_{R_2C}(t) + P_{X_2C}(t).$$

Электромагнитная мощность:

$$P_{yi}(t) = P_J(t) + P_l(t), \quad (2)$$

где динамическая мощность и мощность на валу:

$$P_J(t) = J \cdot \frac{dw(t)}{dt} \cdot w(t); P_M(t) = M(t) \cdot w(t), \quad (3)$$

где J – момент инерции двигателя; $M(t)$ – момент двигателя; $w(t)$ – угловая скорость двигателя.

Мощность источника питания:

$$P_{\dot{e}}(t) = P_{\dot{e}\hat{A}}(t) + P_{\dot{e}\hat{B}}(t) + P_{\dot{e}\hat{N}}(t). \quad (4)$$

Выражения для мгновенной мощности на элементах схемы замещения и источнике полигармонического напряжения:

$$P_R(t) = I(t)^2 R; \quad (5)$$

$$P_L(t) = L \cdot I(t) \cdot \frac{dI(t)}{dt}; \quad (6)$$

$$P_u(t) = U(t) \cdot I(t). \quad (7)$$

Мощность трехфазной системы:

$$P_{\dot{e}\hat{A}}(t) + P_{\dot{e}\hat{B}}(t) + P_{\dot{e}\hat{N}}(t) = P_{y\dot{e}A}(t) + P_{y\dot{e}B}(t) + P_{y\dot{e}C}(t) + P_{yi}(t). \quad (8)$$

Мощность трехфазной системы при учете потерь в стали:

$$P_{\dot{e}\hat{A}}(t) + P_{\dot{e}\hat{B}}(t) + P_{\dot{e}\hat{N}}(t) = P_{y\dot{e}A}(t) + P_{y\dot{e}B}(t) + P_{y\dot{e}C}(t) + P_{yi}(t) + P_{\dot{n}\hat{o}}(t), \quad (9)$$

где $P_{\dot{n}\hat{o}}(t) = P_{\dot{n}\hat{o}A}(t) + P_{\dot{n}\hat{o}B}(t) + P_{\dot{n}\hat{o}C}(t)$.

Таким образом, при анализе трехфазной машины необходимо учитывать не только электрическую мощность, но и мощность механической части двигателя. Для упрощения анализа параметров можно выделить некоторые частные случаи:

- электрическая машина идеальна;
 - сеть симметрична;
 - асинхронный двигатель симметричен.
- Идеальная машина – это электрическая машина, которая отвечает следующим условиям:
- сталь машины ненасыщена;
 - фазные обмотки симметричны и имеют пространственный сдвиг $\frac{2p}{3}$;

- магнитодвижущие силы распределены синусоидально вдоль магнитного зазора;
- ротор электрически и магнитно симметричный.

При симметричном синусоидальном напряжении поле синусоидально, так как идеальная машина не вносит в зазор пространственных гармоник. В случае, если электрическая машина идеальна, электрические мощности всех фаз одинаковы по величине и сдвинуты на соответствующий угол. При симметричных режимах работы электрической машины можно принимать к рассмотрению только одну фазу двигателя.

Распределение составляющих мгновенной мощности трехфазной системы показано на рис. 2 [1]. При этом можно выделить следующие участки: S_I – мгновенная мощность источника полигармонического напряжения, которая поступает на электрический двигатель; S_{II} – мгновенная мощность на активном сопротивлении и индуктивности статорной цепи; S_{III} – мгновенная мощность на активном сопротивлении и индуктивности роторной цепи; S_{IV} – мгновенная мощность механической части асинхронного двигателя; S_V – мгновенная мощность потерь энергии от вихревых токов и гистерезиса.

Определение мощности трехфазной системы рассмотрим для общего случая, когда напряжения и токи по фазам несинусоидальны и несимметричны. Сигналы напряжения и тока фазы А:

$$U_A(t) = \sum_{n_A=1}^{N_A} U_{nA} \cos(n_A \Omega t - y_{nA}); \quad (10)$$

$$I_A(t) = \sum_{m_A=1}^{M_A} I_{mA} \cos(m_A \Omega t - j_{mA}),$$

где U_{nA} – гармонические составляющие напряжения фазы А; I_{mA} – гармонические составляющие тока фазы А; n_A – номер гармоники напряжения фазы А; m_A – номер гармоники тока фазы А; N_A – число гармоник напряжения фазы А; M_A – число гармоник тока фазы А; j_{mA} – угол сдвига фаз фазы А между вектором тока и вектором напряжения; Y_{nA} – угол, учитывающий пространственное расположение вектора напряжения фазы А относительно вещественной оси.

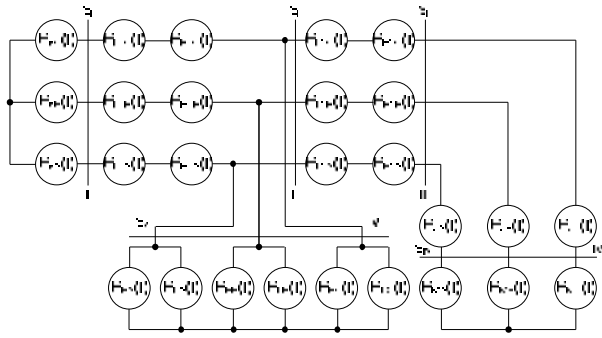


Рисунок 2 – Диаграмма формирования мощностей трехфазного асинхронного двигателя

Примем, что вектор первой гармоники напряжения совпадает с осью, принимаемой за нулевое положение векторов, т.е. $Y_{1A} = 0$.

Напряжение и ток фазы В:

$$U_B(t) = \sum_{n_B=1}^{N_B} U_{nB} \cos(n_B \Omega t - Y_{nB}); \quad (12)$$

$$I_B(t) = \sum_{m_B=1}^{M_B} I_{mB} \cos(m_B \Omega t - j_{mB}),$$

где U_{nB} – гармонические составляющие напряжения фазы В; I_{mB} – гармонические составляющие тока фазы В; n_B – номер гармоники напряжения фазы В; m_B – номер гармоники тока фазы В; N_B – число гармоник напряжения фазы В; M_B – число гармоник тока фазы В; j_{mB} – угол сдвига фаз фазы В между вектором тока и вектором напряжения; Y_{nB} – угол, учитывающий пространственное расположение вектора напряжения фазы В относительно вещественной оси.

Напряжение и ток фазы С:

$$U_C(t) = \sum_{n_C=1}^{N_C} U_{nC} \cos(n_C \Omega t - Y_{nC}); \quad (13)$$

$$I_C(t) = \sum_{m_C=1}^{M_C} I_{mC} \cos(m_C \Omega t - j_{mC}),$$

где U_{nC} – гармонические составляющие напряжения фазы С; I_{mC} – гармонические составляющие тока фазы С; n_C – номер гармоники напряжения фазы С; m_C – номер гармоники тока фазы С; N_C –

число гармоник напряжения фазы С; M_C – число гармоник тока фазы С; j_{mC} – угол сдвига фаз фазы С между вектором тока и вектором напряжения; Y_{nC} – угол, учитывающий пространственное расположение вектора напряжения фазы С относительно вещественной оси.

Гармоники напряжений фаз А, В, С имеют фазовые сдвиги Y_{nA}, Y_{nB}, Y_{nC} относительно вектора первой гармоники напряжения фазы А U_{1A} . Гармоники токов сдвинуты на углы j_{mA}, j_{mB}, j_{mC} относительно соответствующих гармоник напряжения фаз А, В, С. Векторные диаграммы напряжений и токов для 1 и 3 гармоник представлены на рис. 3.

Тогда мгновенная мощность согласно (11) определяется произведением:

$$P_A(t) = U_A(t)I_A(t) = \sum_{n_A=1}^{N_A} U_{nA} \cos(n_A \Omega t - Y_{nA}) \times \\ \times \sum_{m_A=1}^{M_A} I_{mA} \cos(m_A \Omega t - j_{mA}) = \frac{1}{2} \sum_{n_A=1}^{N_A} \sum_{m_A=1}^{M_A} U_{nA} \times \\ \times I_{mA} [\cos(n_A \Omega t + m_A \Omega t - Y_{nA} - j_{mA}) + \\ + \cos(n_A \Omega t - m_A \Omega t - Y_{nA} + j_{mA})] = \\ = \frac{1}{2} \sum_{n_A=1}^{N_A} \sum_{m_A=1}^{M_A} U_{nA} I_{mA} \cos[(n_A + m_A) \Omega t - \\ - (Y_{nA} + j_{mA})] + \frac{1}{2} \sum_{n_A=1}^{N_A} \sum_{m_A=1}^{M_A} U_{nA} I_{mA} \times \\ \times \cos[(n_A - m_A) \Omega t - (Y_{nA} - j_{mA})]. \quad (14)$$

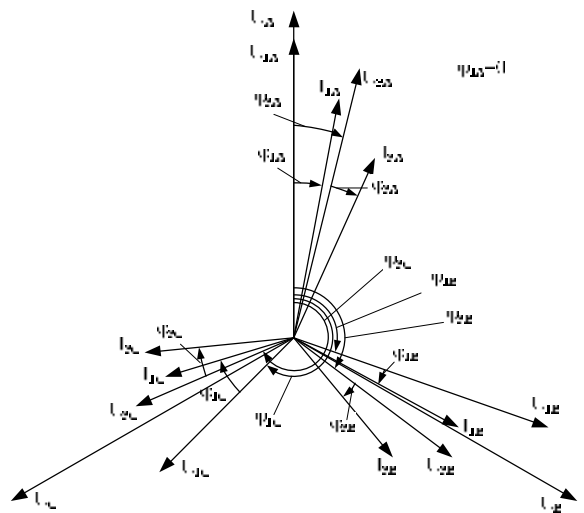


Рисунок 3 – Векторные диаграммы напряжений и токов трехфазной системы

Мгновенная мощность фазы В:

$$P_B(t) = U_B(t)I_B(t) = \sum_{n_B=1}^{N_B} U_{nB} \cos(n_B \Omega t - Y_{nB}) \times \quad (15)$$

$$\times \sum_{m_B=1}^{M_B} I_{mB} \cos(m_B \Omega t - j_{mB}) = \frac{1}{2} \sum_{n_B=1}^{N_B} \sum_{m_B=1}^{M_B} U_{nB} \times$$

$$\begin{aligned} & \times I_{mB} [\cos(n_B \Omega t + m_B \Omega t - y_{nB} - j_{mB}) + \\ & + \cos(n_B \Omega t - m_B \Omega t - y_{nB} + j_{mB})] = \\ & = \frac{1}{2} \sum_{n_B=1}^{N_B} \sum_{m_B=1}^{M_B} U_{nB} I_{mB} \cos[(n_B + m_B) \Omega t - \\ & - (y_{nB} + j_{mB})] + \frac{1}{2} \sum_{n_B=1}^{N_B} \sum_{m_B=1}^{M_B} U_{nB} I_{mB} \times \\ & \times \cos[(n_B - m_B) \Omega t - (y_{nB} - j_{mB})]. \end{aligned}$$

Мгновенная мощность фазы С:

$$\begin{aligned} P_C(t) &= U_C(t) I_C(t) = \sum_{n_C=1}^{N_C} U_{nC} \cos(n_C \Omega t - y_{nC}) \times \\ & \times \sum_{m_C=1}^{M_C} I_{mC} \cos(m_C \Omega t - j_{mC}) = \frac{1}{2} \sum_{n_C=1}^{N_C} \sum_{m_C=1}^{M_C} U_{nC} \times \\ & \times I_{mC} [\cos(n_C \Omega t + m_C \Omega t - y_{nC} - j_{mC}) + \\ & + \cos(n_C \Omega t - m_C \Omega t - y_{nC} + j_{mC})] = \\ & = \frac{1}{2} \sum_{n_C=1}^{N_C} \sum_{m_C=1}^{M_C} U_{nC} I_{mC} \cos[(n_C + m_C) \Omega t - \\ & - (y_{nC} + j_{mC})] + \frac{1}{2} \sum_{n_C=1}^{N_C} \sum_{m_C=1}^{M_C} U_{nC} I_{mC} \times \\ & \times \cos[(n_C - m_C) \Omega t - (y_{nC} - j_{mC})]. \end{aligned} \quad (16)$$

Мощность трехфазной сети определяется суммой мощностей всех фаз [1, 3]:

$$P_{\Sigma}(t) = P_A(t) + P_B(t) + P_C(t). \quad (17)$$

Мгновенная мощность трехфазной системы определяется в форме суммы:

$$\begin{aligned} P_{\Sigma}(t) &= \frac{1}{2} \sum_{m_A=1}^{M_A} \sum_{n_A=1}^{N_A} U_{nA} I_{mA} \cos[(n_A + m_A) \Omega t - \\ & - (y_{nA} + j_{mA})] + \frac{1}{2} \sum_{m_A=1}^{M_A} \sum_{n_A=1}^{N_A} U_{nA} I_{mA} \cos[(n_A - \\ & - m_A) \Omega t - (y_{nA} - j_{mA})] + \frac{1}{2} \sum_{m_B=1}^{M_B} \sum_{n_B=1}^{N_B} U_{nB} I_{mB} \times \\ & \times \cos[(n_B + m_B) \Omega t - (y_{nB} + j_{mB})] + \\ & + \frac{1}{2} \sum_{m_B=1}^{M_B} \sum_{n_B=1}^{N_B} U_{nB} I_{mB} \cos[(n_B - m_B) \Omega t - \\ & - (y_{nB} - j_{mB})] + \frac{1}{2} \sum_{m_C=1}^{M_C} \sum_{n_C=1}^{N_C} U_{nC} I_{mC} \cos[(n_C + \\ & + m_C) \Omega t - (y_{nC} + j_{mC})] + \frac{1}{2} \sum_{m_C=1}^{M_C} \sum_{n_C=1}^{N_C} U_{nC} I_{mC} \times \\ & \times \cos[(n_C - m_C) \Omega t - (y_{nC} - j_{mC})]. \end{aligned} \quad (18)$$

После преобразований получим мгновенную мощность трехфазной системы:

$$\begin{aligned} P_{\Sigma}(t) &= \sum_{k_A=0}^{K_A} P_{kA} \cos(k_A \Omega t - f_{kA}) + \\ & + \sum_{k_B=0}^{K_B} P_{kB} \cos(k_B \Omega t - f_{kB}) + \sum_{k_C=0}^{K_C} P_{kC} \cos(k_C \Omega t - f_{kC}), \end{aligned} \quad (19)$$

$$\text{где } P_{kA} = \frac{1}{2} \sum_{m_A=1}^{M_A} \sum_{n_A=1}^{N_A} U_{nA} I_{mA}; \quad P_{kB} = \frac{1}{2} \sum_{m_B=1}^{M_B} \sum_{n_B=1}^{N_B} U_{nB} I_{mB};$$

$$P_{kC} = \frac{1}{2} \sum_{m_C=1}^{M_C} \sum_{n_C=1}^{N_C} U_{nC} I_{mC}; \quad k_A = n_A \pm m_A; \quad k_B = n_B \pm m_B;$$

$$k_C = n_C \pm m_C; \quad f_{kA} = y_{nA} \pm j_{mA}; \quad f_{kB} = y_{nB} \pm j_{mB}; \\ f_{kC} = y_{nC} \pm j_{mC}; \quad K_A = N_A + M_A; \quad K_B = N_B + M_B; \\ K_C = N_C + M_C.$$

Окончательно имеем выражение для мгновенной мощности трехфазной системы:

$$\begin{aligned} P_{\Sigma}(t) &= P_{0A} \cos(f_{kA}) + \sum_{k_A=1}^{K_A} P_{kA} \cos(k_A \Omega t - f_{kA}) + \\ & + P_{0B} \cos(f_{kB}) + \sum_{k_B=1}^{K_B} P_{kB} \cos(k_B \Omega t - f_{kB}) + \\ & + P_{0C} \cos(f_{kC}) + \sum_{k_C=1}^{K_C} P_{kC} \cos(k_C \Omega t - f_{kC}). \end{aligned} \quad (20)$$

Для случая, когда порядок гармоник напряжения и тока равны, т.е. $m_A = n_A$, $m_B = n_B$, $m_C = n_C$, получим:

$$\begin{aligned} P_{\Sigma}(t) &= \frac{1}{2} \sum_{m_A=1}^{M_A} \sum_{n_A=1}^{N_A} U_{nA} I_{mA} \cos(2n_A \Omega t - (y_{nA} + j_{mA})) + \\ & + \frac{1}{2} \sum_{m_A=1}^{M_A} \sum_{n_A=1}^{N_A} U_{nA} I_{mA} \cos(y_{nA} - j_{mA}) + \\ & + \frac{1}{2} \sum_{m_B=1}^{M_B} \sum_{n_B=1}^{N_B} U_{nB} I_{mB} \cos(2n_B \Omega t - (y_{nB} + j_{mB})) + \\ & + \frac{1}{2} \sum_{m_B=1}^{M_B} \sum_{n_B=1}^{N_B} U_{nB} I_{mB} \cos(y_{nB} - j_{mB}) + \\ & + \frac{1}{2} \sum_{m_C=1}^{M_C} \sum_{n_C=1}^{N_C} U_{nC} I_{mC} \cos(2n_C \Omega t - (y_{nC} + j_{mC})) + \\ & + \frac{1}{2} \sum_{m_C=1}^{M_C} \sum_{n_C=1}^{N_C} U_{nC} I_{mC} \cos(y_{nC} - j_{mC}) = \\ & = \frac{1}{2} \left[\sum_{m_A=1}^{M_A} \sum_{n_A=1}^{N_A} U_{nA} I_{mA} \cos(y_{nA} - j_{mA}) + \right. \\ & + \sum_{m_B=1}^{M_B} \sum_{n_B=1}^{N_B} U_{nB} I_{mB} \cos(y_{nB} - j_{mB}) + \\ & + \sum_{m_C=1}^{M_C} \sum_{n_C=1}^{N_C} U_{nC} I_{mC} \cos(y_{nC} - j_{mC}) \left. \right] + \\ & + \frac{1}{2} \sum_{m_A=1}^{M_A} \sum_{n_A=1}^{N_A} U_{nA} I_{mA} \cos(2n_A \Omega t - (y_{nA} + j_{mA})) + \\ & + \frac{1}{2} \sum_{m_B=1}^{M_B} \sum_{n_B=1}^{N_B} U_{nB} I_{mB} \cos(2n_B \Omega t - (y_{nB} + j_{mB})) + \\ & + \sum_{m_C=1}^{M_C} \sum_{n_C=1}^{N_C} U_{nC} I_{mC} \cos(2n_C \Omega t - (y_{nC} + j_{mC})). \end{aligned} \quad (21)$$

При симметричной системе несинусоидальных напряжений и токов углы сдвига фаз равны соответственно: для фазы А – 0, фазы В – $2\pi/3$, фазы С – $4\pi/3$.

Тогда выражение для мгновенной мощности:

$$P_{\Sigma}(t) = P_{0A} \cos(f_{kA}) + \sum_{k_A=1}^{K_A} P_{kA} \cos(k_A \Omega t - f_{kA}) + P_{0B} \cos(f_{kB}) + \sum_{k_B=1}^{K_B} P_{kB} \cos(k_B \Omega t - f_{kB}) + P_{0C} \cos(f_{kC}) + \sum_{k_C=1}^{K_C} P_{kC} \cos(k_C \Omega t - f_{kC}) = P_{0A} + P_{0B} + P_{0C} + \sum_{k_A=1}^{K_A} P_{kA} \cos(k_A \Omega t) + \sum_{k_B=1}^{K_B} P_{kB} \cos(k_B \Omega t - k_B \cdot \frac{2p}{3}) + \sum_{k_C=1}^{K_C} P_{kC} \cos(k_C \Omega t - k_C \cdot \frac{4p}{3}).$$

При симметричной системе несинусоидальных напряжений и токов амплитудные значения гармоник мощностей равны:

$$P_{0A} = P_{0B} = P_{0C} = P_0, P_{kA} = P_{kB} = P_{kC} = P_k.$$

С учетом того, что равны $k_A = k_B = k_C = k$, $K_A = K_B = K_C = K$, получим:

$$P_{\Sigma}(t) = 3P_0 + \sum_{k=1}^K P_k \cos(k\Omega t) + \sum_{k=1}^K P_k \cos(k\Omega t - k \cdot \frac{2p}{3}) + \sum_{k=1}^K P_k \cos(k\Omega t - k \cdot \frac{4p}{3}) = 3P_0 + \sum_{k=1}^K P_k [\cos(k\Omega t) + \cos(k\Omega t - k \cdot \frac{2p}{3}) + \cos(k\Omega t - k \cdot \frac{4p}{3})].$$

С учетом того, что $\cos(k \cdot 2\pi/3)$ при $k = 3, 6, 9, 12, \dots$ всегда равен 1 и $\cos(k \cdot 4\pi/3)$ при $k = 3, 6, 9, 12, \dots$ равен 1, получим:

$$P_{\Sigma}(t) = 3P_0 + 3 \sum_{k=1}^K P_k \cos(k\Omega t). \quad (22)$$

Составляющие функции $\cos(k \cdot f)$ для различных углов и значений k приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Значения коэффициента k и составляющих функции $\cos(k \cdot f)$

k	$\cos(0)$	$\cos(k \cdot \frac{2p}{3})$	$\cos(k \cdot \frac{4p}{3})$	Сумма
0	1	1	1	3
1	1	-0,5	-0,5	0
2	1	-0,5	-0,5	0
3	1	1	1	3
4	1	-0,5	-0,5	0
5	1	-0,5	-0,5	0
6	1	1	1	3
7	1	-0,5	-0,5	0

С учетом полученных данных мгновенная мощность трехфазной симметричной системы имеет вид:

$$P_{\Sigma}(t) = \frac{3}{2} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N U_n I_m + \frac{3}{2} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N U_n I_m \cos(k\Omega t), \quad (23)$$

причем

$$U_{nA} = U_{nB} = U_{nC} = U_n;$$

$$I_{mA} = I_{mB} = I_{mC} = I_m;$$

$$m_A = m_B = m_C = m; M_A = M_B = M_C = M;$$

$$n_A = n_B = n_C = n; N_A = N_B = N_C = N.$$

В качестве примера рассмотрим формирование составляющих мгновенной мощности трехфазной системы при наличии лишь двух гармоник напряжения и тока.

$$U_A(t) = U_{1A} \cos(\Omega t - y_{1A}) + U_{3A} \cos(3\Omega t - y_{3A});$$

$$I_A(t) = I_{1A} \cos(\Omega t - j_{1A}) + I_{3A} \cos(3\Omega t - j_{3A}). \quad (24)$$

Аналогично, напряжения и токи фаз В и С:

$$U_B(t) = U_{1B} \cos(\Omega t - y_{1B}) + U_{3B} \cos(3\Omega t - y_{3B}); \quad (25)$$

$$I_B(t) = I_{1B} \cos(\Omega t - j_{1B}) + I_{3B} \cos(3\Omega t - j_{3B}).$$

$$U_C(t) = U_{1C} \cos(\Omega t - y_{1C}) + U_{3C} \cos(3\Omega t - y_{3C}); \quad (26)$$

$$I_C(t) = I_{1C} \cos(\Omega t - j_{1C}) + I_{3C} \cos(3\Omega t - j_{3C}).$$

Мгновенная мощность фазы А:

$$P_A(t) = U_A(t) \cdot I_A(t) = (U_{1A} \cos(\Omega t - y_{1A}) + U_{3A} \cos(3\Omega t - y_{3A})) (I_{1A} \cos(\Omega t - j_{1A}) + I_{3A} \cos(3\Omega t - j_{3A})) = \frac{1}{2} U_{1A} I_{1A} \cos(2\Omega t - y_{1A} - j_{1A}) + \frac{1}{2} U_{1A} I_{1A} \cos(y_{1A} - j_{1A}) + \frac{1}{2} U_{1A} I_{3A} \cos(4\Omega t - y_{1A} - j_{3A}) + \frac{1}{2} U_{1A} I_{3A} \cos(2\Omega t + y_{1A} - j_{3A}) + \frac{1}{2} U_{3A} I_{1A} \cos(4\Omega t - y_{3A} - j_{1A}) + \frac{1}{2} U_{3A} I_{1A} \cos(2\Omega t - y_{3A} + j_{1A}) +$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{1}{2} U_{3A} I_{3A} \cos(6\Omega t - \gamma_{3A} - j_{3A}) + \\
& + \frac{1}{2} U_{3A} I_{3A} \cos(\gamma_{3A} - j_{3A}).
\end{aligned}$$

Аналогично определяются мощности фаз В и С.

Мгновенная мощность трехфазной системы для рассматриваемого случая:

$$P_{\Sigma}(t) = P_A(t) + P_B(t) + P_C(t).$$

Мгновенная мощность трехфазной системы с учетом преобразований:

$$\begin{aligned}
P_{\Sigma}(t) = & P_{0A} + P_{2aA} \cos(2\Omega t) + P_{2bA} \sin(2\Omega t) + \\
& + P_{4aA} \cos(4\Omega t) + P_{4bA} \sin(4\Omega t) + P_{6aA} \cos(6\Omega t) + \\
& + P_{6bA} \sin(6\Omega t) + P_{0B} + P_{2aB} \cos(2\Omega t) + \\
& + P_{2bB} \sin(2\Omega t) + P_{4aB} \cos(4\Omega t) + P_{4bB} \sin(4\Omega t) + \\
& + P_{6aB} \cos(6\Omega t) + P_{6bB} \sin(6\Omega t) + P_{0C} + \\
& + P_{2aC} \cos(2\Omega t) + P_{2bC} \sin(2\Omega t) + P_{4aC} \cos(4\Omega t) + \\
& + P_{4bC} \sin(4\Omega t) + P_{6aC} \cos(6\Omega t) + P_{6bC} \sin(6\Omega t),
\end{aligned} \quad (27)$$

где

$$\begin{aligned}
P_{0A} = & \frac{1}{2} U_{1A} I_{1A} \cos(\gamma_{1A} - j_{1A}) + \\
& + \frac{1}{2} U_{3A} I_{3A} \cos(\gamma_{3A} - j_{3A}); \\
P_{2aA} = & \frac{1}{2} U_{1A} I_{1A} \cos(\gamma_{1A} + j_{1A}) + \frac{1}{2} U_{1A} I_{3A} \times \\
& \times \cos(j_{3A} - \gamma_{1A}) + \frac{1}{2} U_{3A} I_{1A} \cos(\gamma_{3A} - j_{1A}); \\
P_{2bA} = & \frac{1}{2} U_{1A} I_{1A} \sin(\gamma_{1A} + j_{1A}) + \frac{1}{2} U_{1A} I_{3A} \times \\
& \times \sin(j_{3A} - \gamma_{1A}) + \frac{1}{2} U_{3A} I_{1A} \sin(\gamma_{3A} - j_{1A}); \\
P_{4aA} = & \frac{1}{2} U_{1A} I_{3A} \cos(\gamma_{1A} + j_{3A}) + \\
& + \frac{1}{2} U_{3A} I_{1A} \cos(\gamma_{3A} + j_{1A}); \\
P_{4bA} = & \frac{1}{2} U_{1A} I_{3A} \sin(\gamma_{1A} + j_{3A}) + \\
& + \frac{1}{2} U_{3A} I_{1A} \sin(\gamma_{3A} + j_{1A}); \\
P_{6aA} = & \frac{1}{2} U_{3A} I_{3A} \cos(\gamma_{3A} + j_{3A}); \\
P_{6bA} = & \frac{1}{2} U_{3A} I_{3A} \sin(\gamma_{3A} + j_{3A}).
\end{aligned} \quad (28)$$

С учетом полученных выше результатов для симметричной системы получим:

$$\begin{aligned}
P_{\Sigma}(t) = & P_{0A} + P_{6aA} \cos(6\Omega t) + P_{0B} + \\
& + P_{6aB} \cos(6\Omega t) + P_{0C} + P_{6aC} \cos(6\Omega t) = \\
= & 3P_0 + 3P_6 \cos(6\Omega t),
\end{aligned} \quad (29)$$

т.к.

$$\begin{aligned}
f_{6A} = & 0, f_{6B} = 6 \cdot \frac{2p}{3}, f_{6C} = 6 \cdot \frac{4p}{3}, \\
P_{6A} = & P_{6B} = P_{6C} = P_6; \\
P_{0A} = & P_{0B} = P_{0C} = P_0.
\end{aligned}$$

Оценку полученных результатов проведем, используя эффективную мощность несимметричной трехфазной системы, которая определяется выражением:

$$P_y = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (P_{\Sigma}(t))^2 dt}. \quad (30)$$

Эффективное значение мгновенной мощности фазы А:

$$P_y = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left(P_{0A} + P_{2aA} \cos(2\Omega t) + P_{2bA} \sin(2\Omega t) + P_{4aA} \cos(4\Omega t) + P_{4bA} \sin(4\Omega t) + P_{6aA} \cos(6\Omega t) + P_{6bA} \sin(6\Omega t) \right)^2 dt}. \quad (31)$$

Полученные характеристики эффективного значения мощности фазы А и трехфазной системы, постоянной составляющей при изменении углов сдвига фаз и амплитудных значений напряжения и тока третьей гармоники показаны на рис. 4, 5, 6.

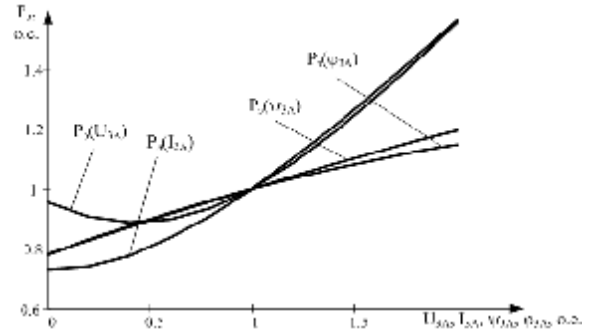


Рисунок 4 – Зависимость эффективного значения мгновенной мощности трехфазной системы от $U_{3A}, j_{3A}, U_{3A}, I_{3A}$

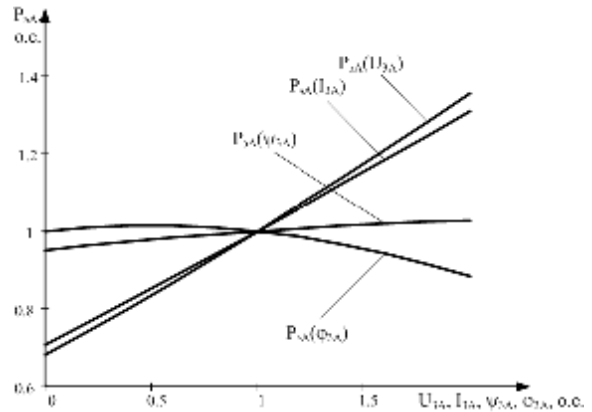


Рисунок 5 – Зависимость эффективного значения мгновенной мощности фазы А от $U_{3A}, j_{3A}, U_{3A}, I_{3A}$

Характеристики асинхронных двигателей могут отличаться от тех, которые заложены заводом-изготовителем. Это объясняется появлением дефектов у электрических машин, которые прошли ремонт или находящихся долгое время в эксплуатации. Дефекты электродвигателей возникают в результате износа деталей и старения материалов, а также при нарушении правил технической эксплуатации. По месту их возникновения и характеру

происхождения повреждения электродвигателей подразделяют на электрические и механические. К электрическим относят повреждения изоляции или токопроводящих частей обмоток, коллекторов, контактных колец и листов сердечников. Механическими повреждениями считают ослабление посадок, нарушения формы и поверхности деталей и т.п. Неисправности часто можно установить лишь по косвенным признакам.

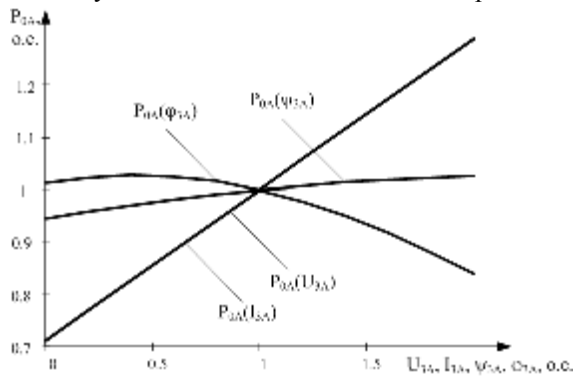


Рисунок 6 – Зависимость постоянной составляющей мгновенной мощности фазы А от $U_{3A}, j_{3A}, U_{3A}, I_{3A}$

Для каждого дефекта можно разработать схему замещения для его учета по наличию определенных диагностических признаков. Так, увеличение тока холостого хода происходит в результате значительного уменьшения сопротивления цепи намагничивания, вследствие чего можно сделать вывод о том, что есть нарушение величины воздушного зазора или закорочены листы стали. Наличие повышенного уровня вибрации свидетельствует о наличии момента, который помимо постоянной составляющей содержит и знакопеременные гармонические составляющие, или неисправны подшипники.

Несинусоидальность фазных токов обусловлена появлением гармонических составляющих, которые возникают вследствие нелинейности кривой намагничивания [7, 11]. Особенностью схемы замещения, представленной на рис. 7, является контур намагничивания, который состоит из двух ветвей, одна из которых учитывает насыщение стали, а другая – вихревые токи. Контур вихревых токов образуется активным сопротивлением R_{an} и индуктивностью L_{an} , включенных параллельно контуру намагничивания [11].

Несмотря на значительность вихревых токов, они все же существенно ниже тока намагничивания. Для учета нелинейности кривой намагничивания может использоваться схема замещения, представленная на рис. 8. Нелинейная индуктивность в схеме представлена в виде ЭДС контура намагничивания [7, 8, 11]. Различные токи по фазам обусловлены несимметрией сопротивлений двигателя [4]. Схема замещения, приведенная на рис. 9, может использоваться при учете эффекта вытеснения тока в роторе.

Таким образом, можно составить таблицу дефектов и соответствующих им диагностических признаков (табл. 2).

Таблица 2 – Диагностические признаки и дефекты асинхронного двигателя

№ п/п	Диагностический признак	Дефект
1	Токи синусоидальны, симметричны	Отсутствует
2	Изменение тока холостого хода по фазам	Нарушение величины воздушного зазора или увеличение вихревых токов
3	Несимметрия токов	Изменение сопротивлений фаз двигателя
4	Несинусоидальность токов	Изменение свойств стали (ее насыщение)
5	Наличие повышенного уровня вибраций	Появление знакопеременного момента, нарушение креплений АД, дефекты подшипников и т.д.

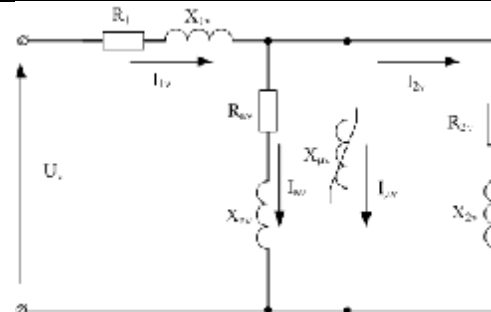


Рисунок 7 – Схема замещения с учетом потерь от вихревых токов

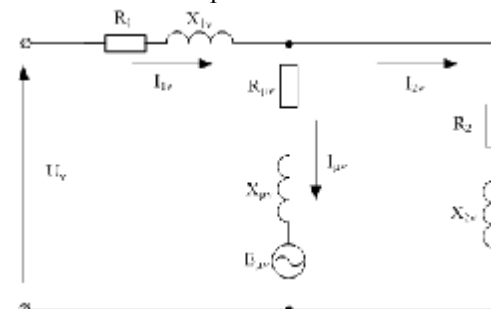


Рисунок 8 – Схема замещения с учетом нелинейности кривой намагничивания

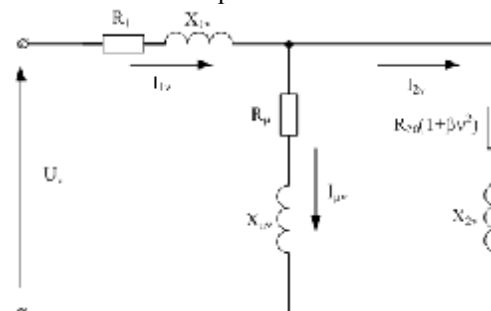


Рисунок 9 – Схема замещения с учетом эффекта вытеснения тока в роторе

Таким образом, учет дефектов можно проводить путем введения в схему замещения дополнительных элементов и нелинейностей. В асинхронном двигателе можно выделить следующие нелинейности: нелинейность кривой намагничивания, нелинейность, которая описывает эффект вытеснения тока в роторе, нелинейность нагрузки. Нелинейность кривой намагничивания описывается выражением [7, 8, 11]:

$$L(I) = a_1 + 3a_3 \cdot I(t)^2 + \dots + (2p-1)a_{2p-1} \cdot I(t)^{2p}, \quad (32)$$

где $a_1, a_3, \dots, a_{2p-1}$ – постоянные коэффициенты, которые определяются при аппроксимации кривой намагничивания; p – порядок полинома. Определение электромагнитных параметров асинхронного двигателя с учетом нелинейности кривой намагничивания можно проводить с использованием схемы замещения, изображенной на рис. 8 [7, 8].

Ток, протекающий через нелинейную индуктивность, можно представить в виде:

$$I(t) = \sum_{n=1}^N I_{na} \cos(n\Omega t) + \sum_{n=1}^N I_{nb} \sin(n\Omega t), \quad (33)$$

где $I_{na} = I_n \cos(j_n)$ – косинусная составляющая тока; $I_{nb} = I_n \sin(j_n)$ – синусная составляющая тока.

Индуктивность можно представить выражением:

$$L(t) = L_0 + \sum_{p=2}^P L_{pa} \cos(p\Omega t) + \sum_{p=2}^P L_{pb} \sin(p\Omega t), \quad (34)$$

где L_0 – постоянная составляющая нелинейной индуктивности; L_{pa}, L_{pb} – соответственно косинусные и синусные составляющие нелинейной индуктивности на высших гармониках; p – номер гармоники нелинейной индуктивности; P – число гармоник нелинейной индуктивности.

В схеме на рис. 8 ЭДС имеет вид [7, 8, 11]:

$$E(t) = \frac{d}{dt}(L(t) \cdot I(t)) = L(t) \cdot \frac{d}{dt}(I(t)) + I(t) \cdot \frac{d}{dt}(L(t)). \quad (35)$$

Нелинейность, которая описывает эффект вытеснения тока в роторе (рис. 6) [4]:

$$R'_2(n, b) = R'_{20} \cdot (1 + b \cdot n^2), \quad (36)$$

где R'_{20} – сопротивление ротора при частоте равной нулю; b – коэффициент, определяющий влияние эффекта вытеснения.

Нелинейность нагрузки учитывается при анализе трехфазной системы с механической частью, приведенной на рис. 2.

Идентификация электромагнитных параметров электрической машины проводится с использованием гармонических составляющих фазных напряжений и токов статора. На начальном этапе проверки электрического двигателя на работоспособность необходимо проверить качество напряжения сети. Целью проверки является определение влияния некачественности питающей сети на асинхронные двигатели [5]. После этого проводится процедура идентификации электромагнитных параметров асинхронного двигателя.

Таким образом, необходимо определить схему замещения асинхронного двигателя и на основании ее определить электромагнитные параметры путем решения системы уравнений. Система уравнений составляется в соответствии с принципами суперпозиции напряжений или мощностей.

Таким образом, можно рассмотреть следующие методы для определения электромагнитных параметров [6, 9, 10]:

- метод с использованием полных сопротивлений схемы замещения;
- метод с использованием низкочастотного питания асинхронного двигателя;
- метод с использованием уравнений баланса активной мощности;
- метод с использованием уравнений баланса реактивной мощности;
- метод с использованием уравнений баланса канонических составляющих гармоник мгновенной мощности;
- метод с использованием уравнений баланса неканонических составляющих гармоник мгновенной мощности;
- метод с использованием полных уравнений баланса составляющих гармоник мгновенной мощности.

Проведение операции идентификации электромагнитных параметров электрической машины осуществляется с использованием комплекса, который содержит датчики напряжения и тока, аналого-цифровой преобразователь, компьютер с необходимым программным обеспечением для сбора и обработки информации. Запись сигналов тока и напряжения осуществляется в течение времени, необходимого для выполнения спектрального анализа. Оцифрованные АЦП данные передаются в ЭВМ, где выполняется их обработка (осуществляется спектральный анализ сигналов напряжения и тока) и определение электромагнитных параметров асинхронного двигателя.

Выводы. Анализ показал, что:

- использование Т-образной схемы замещения не всегда допустимо из-за значительных погрешностей при определении электромагнитных параметров асинхронных двигателей, которые прошли ремонт или находящихся долгое время в эксплуатации;
- каждый дефект в электрической машине может быть учтен дополнительным контуром или нелинейностью в схеме замещения;

- каждому дефекту электрической машины соответствует свой диагностический признак, по которому можно выявить появление неисправности асинхронного двигателя и учесть это при дальнейшей процедуре идентификации электромагнитных параметров;
- необходимость выбора схемы замещения в зависимости от дефектов определяется по признакам с использованием гармонического анализа токов и напряжений при работе двигателя в режиме холостого хода при номинальном напряжении питания;
- при наличии нелинейностей или несимметрии электрической машины недопустимо использовать для анализа однофазную схему замещения, вследствие чего необходимо пользоваться трехфазной схемой замещения с учетом механической части;
- для определения электромагнитных параметров электрических машин при наличии дефектов используется метод энергодиагностики с использованием уравнений баланса гармоник мгновенной мощности, который позволяет учесть в схеме замещения дополнительные контура и нелинейности, а также исключить несимметрию и несинусоидальность питающего напряжения, даже если их показатели не выходят за рамки стандарта;
- в симметричной по конструкции электрической машине дефекты, вызванные насыщением, приводят к появлению в кривой момента знакопеременных составляющих кратных трем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Родькин Д.И., Миттева потужність трифазного двигунного навантаження з полігармонічними напругою та струмом // Журнал „Електроінформ”, 2007. – №4 – С. 10 – 13.
2. Рогозин Г.Г. Определение электромагнитных параметров машин переменного тока. Новые экспериментальные методы. – К.: Техніка, 1992. – 168 с.
3. Родькин Д.И., Ромашихин Ю.В., Калинов А.П., Мамчур Д.Г., Сенченко С.М. Мгновенная мощность сложных электрических цепей // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Кременчук: КДПУ ім. М. Остроградського, 2008. – Вип. 3-4 (4). – С. 11 – 25.
4. Родькин Д.И., Калинов А.П., Ромашихин Ю.В. Эффективность метода энергодиагностики параметров двигателей переменного тока // Электроприводы переменного тока: Труды международной 14 НТК. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2007. – С. 273 – 278.
5. Калинов А.П., Мамчур Д.Г., Херардо Веласке Ангуло. Определение влияния некачественности питающей сети на электрические машины переменного тока в задачах диагностики // Вісник НТУ «ХП», «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика» – Харків: НТУ «ХП», 2008. – № 30. – С. 559 – 563.

6. Родькин Д.И. Баланс составляющих мгновенной мощности полигармонических сигналов // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету ім. М. Остроградського. – Кременчук, 2007. – Вип. 3 (44). – С. 66 – 71.

7. Огарь В.А., Родькин Д.И., Калинов А.П. Обоснование аналитической оценки потерь в насыщенной стали асинхронного двигателя // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету ім. М. Остроградського. – Кременчук, 2007. – Вип. 4 (45) – С. 98 – 103.

8. Родькин Д.И., Ромашихин Ю.В. Мгновенная мощность нелинейных элементов электрической цепи // XIV міжнар. наук.-техн. конф. “Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика”. Сборник научных трудов Днепродзержинского государственного технического университета. – Днепродзержинск: ДГТУ, 2007. – С. 501 – 506.

9. Родькин Д.И., Ромашихин Ю.В. Возможности и эффективность метода энергодиагностики в идентификационных задачах // XIV міжнар. наук.-техн. конф. “Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика”. Сборник научных трудов Днепродзержинского государственного технического университета. – Днепродзержинск: ДГТУ, 2007. – С. 507 – 512.

10. Родькин Д.И., Огарь В.А. Возможность и эффективность метода мгновенной мощности в идентификационных задачах // Науково-прикладний журнал „Технічна електродинаміка”. – Київ, 2008. – Ч.1. – С. 30 – 32.

11. Родькин Д.И., Огарь В.А., Ромашихин Ю.В. О разделении на составляющие потерь в стали электрических машин // XIV міжнар. наук.-техн. конф. “Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика”. Сборник научных трудов Днепродзержинского государственного технического университета. – Днепродзержинск: ДГТУ, 2007. – С. 495 – 500.

Стаття надійшла 15.07.2009 р.
Рекомендовано до друку д.т.н., проф.
Чорним О.П.