

УДК 621.313.333.02

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ МЕТОД ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Ромашихин Ю.В., ассистент, Родькин Д.И., д.т.н., проф., Калинов А.П., к.т.н., доц. Кременчугский государственный политехнический университет им. М. Остроградского 39614, г. Кременчуг, ул. Первомайская, 20
E-mail: saue@polytech.poltava.ua

В статті розглянутий метод визначення електромагнітних параметрів асинхронного двигуна за повними рівняннями миттєвої потужності. Показана можливість визначення складових миттєвої потужності, розглянута ефективність метода при визначенні електромагнітних параметрів асинхронного двигуна.

Ключові слова: потужність, баланс потужностей, електромагнітні параметри.

The method of definition of electromagnetic parameters of the asynchronous engine is considered on the complete equations of instant capacity is discussed in the paper. The opportunity of definition making instant capacity, is shown the efficiency of a method is considered at definition of electromagnetic parameters of the asynchronous engine.

Key words: capacity, balance of capacities, electromagnetic parameters.

Введение. Усовершенствование различных электротехнических и электромеханических систем приводит к расширению спектра задач, решаемых с помощью результатов идентификации параметров машин переменного тока. Значения электромагнитных параметров используются для решения вопросов, связанных с выбором и расчетом устройств защиты и автоматики машин переменного тока, в задачах испытаний электрических машин и управления потреблением электрической энергии, при решении вопросов исследовательского характера и учебного процесса, при настройке систем управления координатами асинхронных электроприводов с векторным управлением.

Таким образом, качество реализации и настройки систем непрерывного мониторинга, частотного и векторного регулирования скорости вращения, компенсации реактивной мощности и т.д., зависят от наличия адекватной информации о параметрах электрической машины.

Анализ предыдущих исследований. Методы определения параметров электрических машин переменного тока разнообразны и используются в инженерной практике достаточно широко, хотя их нельзя отнести к полностью изученным и применимым в любых условиях.

Большинство методов определения электромагнитных параметров базируются на анализе переходных процессов, которые возникают в результате изменения электромагнитного состояния электрической машины. Как отдельный класс можно выделить методы, которые реализуются при периодических гармонических воздействиях.

Рассматриваемый вопрос требует специального анализа или, в крайнем случае, уточнения.

Цель работы. Рассмотрение метода определения электромагнитных параметров асинхронного двигателя по полным уравнениям мгновенной мощности и оценка его эффективности.

Материал и результаты исследования. Современные методы идентификации параметров электромеханических систем базируются на уравнениях баланса мощности соответствующих электрических цепей. Нахождение электромагнитных параметров возможно при питании асинхронного двигателя полигармоническим напряжением (например, от тиристорного регулятора напряжения). Асинхронный двигатель при питании его от тиристорного регулятора напряжения можно представить Т-образной схемой замещения, которая состоит из первичной цепи, контура намагничивания и вторичной цепи (рис. 1).

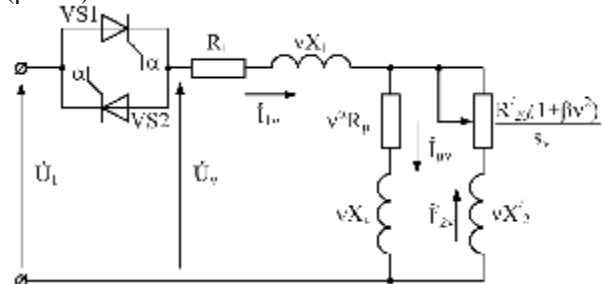


Рисунок 1 – Схема включения фазы асинхронного двигателя при питании от тиристорного регулятора напряжения

Таким образом, рассмотрение Т-образной схемы замещения позволяет получить систему энергобаланса в виде суммы мощностей на источнике полигармонического напряжения и элементах схемы замещения [1]:

$$\begin{aligned}
 P_{0и\Sigma} &= P_{0R_1} + P_{0R_\mu} + P_{0R'/2}; \\
 P_{каи\Sigma} &= P_{каR_1} + P_{каR_\mu} + P_{каR'/2} + \\
 &+ P_{каL_1} + P_{каL_\mu} + P_{каL'/2};
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

$$P_{kbi\Sigma} = P_{kbR_1} + P_{kbR_\mu} + P_{kbR'_2} + P_{kbL_1} + P_{kbL_\mu} + P_{kbL'_2},$$

где $P_{0и\Sigma}$, P_{0R_1} , P_{0R_μ} , $P_{0R'_2}$ – постоянные составляющие мгновенной мощности соответственно источника полигармонического напряжения и активных сопротивлений первичной цепи, контура намагничивания и вторичной цепи; $P_{каи\Sigma}$, $P_{kbi\Sigma}$ – косинусные и синусные составляющие мгновенной мощности источника полигармонического напряжения; P_{kaR} , P_{kbR} , P_{kaL} , P_{kbL} – косинусные и синусные составляющие мгновенной мощности на активных и индуктивных сопротивлениях первичной цепи, контура намагничивания и вторичной цепи.

При соответствующем питании можно получить выражения для сигналов напряжения и тока в виде [2]:

$$u(t) = \sum_{n=1}^{\infty} U_n \cos(n\Omega t - \psi_n); \quad (2)$$

$$i(t) = \sum_{m=1}^{\infty} I_m \cos(m\Omega t - \psi_m), \quad (3)$$

где U_n и I_m – амплитуды гармонических составляющих напряжения и тока; n и m – номера гармоник соответственно напряжения и тока; Ω – круговая частота сети питания; ψ_n и ψ_m – угол сдвига фаз гармоник напряжения и тока.

Основываясь на уравнении баланса мощностей составляется система уравнений для определения электромагнитных параметров асинхронного двигателя. Первое уравнение определяет равенство постоянных составляющих мгновенной мощности на источнике и элементах схемы замещения, последующие уравнения – равенство знакопеременных составляющих мгновенной мощности для соответствующих гармоник мощности. Таким образом, использование одной гармоники напряжения и тока, например, первой, позволяет получить постоянную составляющую и две знакопеременные составляющие (косинусные и синусные) со следующими номерами гармоник мгновенной мощности $k = m \pm n$, $k = 0$, $k = 2$. Использование каждой следующей гармоники напряжения и тока позволяет получить дополнительно по четыре гармоники знакопеременных составляющих мгновенной мощности. Например, при использовании 1 и 3 гармоники сетевого напряжения получают следующие составляющие мгновенной мощности: 0, 2, 4, 6.

Использование уравнений баланса мощностей позволяет определить неизвестные электромагнитные параметры (сопротивление статора R_1 , индуктивное сопротивление рассеяния статора X_1 ; сопротивление рассеяния ротора X'_2 ; сопротивление ротора R'_2 ; активное R_μ и индуктивное X_μ сопротивления контура намагничивания), а также неизвестные составляющие токов (косинусные и синусные)

вторичной цепи и контура намагничивания. При этом по закону Кирхгофа ток первичной цепи равен сумме токов контура намагничивания и вторичной цепи на соответствующей гармонике: $I_{1v} = I_{\mu v} + I'_{2v}$.

Для определения электромагнитных параметров асинхронного двигателя необходимо получить выражения составляющих мгновенной мощности на различных элементах и составить уравнения баланса мощностей для каждой гармоники мгновенной мощности.

Таким путем, для составления уравнений баланса мощностей получены выражения мгновенной мощности на источнике полигармонического напряжения, а также на элементах схемы замещения – активном сопротивлении и индуктивности [2]:

– для источника:

$$P_{0и\Sigma} = \frac{1}{2} \left[\sum_{m=1}^M U_{1m} \cos \varphi_{1m} \sum_{n=1}^N I_{1n} \cos \psi_{1n} + \sum_{m=1}^M U_{1m} \sin \varphi_{1m} \sum_{n=1}^N I_{1n} \sin \psi_{1n} \right]; \quad (4)$$

$$P_{каи\Sigma} = \frac{1}{2} \left[\sum_{m=1}^M U_{1m} \cos \varphi_{1m} \sum_{n=1}^N I_{1n} \cos \psi_{1n} + \sum_{m=1}^M U_{1m} \cos \varphi_{1m} \sum_{n=1}^N I_{1n} \cos \psi_{1n} + \sum_{m=1}^M U_{1m} \sin \varphi_{1m} \sum_{n=1}^N I_{1n} \sin \psi_{1n} - \sum_{m=1}^M U_{1m} \sin \varphi_{1m} \sum_{n=1}^N I_{1n} \sin \psi_{1n} \right] \times \cos(k\Omega t); \quad (5)$$

$$P_{kbi\Sigma} = \frac{1}{2} \left[\sum_{m=1}^M U_{1m} \cos \varphi_{1m} \sum_{n=1}^N I_{1n} \sin \psi_{1n} + \sum_{m=1}^M U_{1m} \cos \varphi_{1m} \sum_{n=1}^N I_{1n} \sin \psi_{1n} + \sum_{m=1}^M U_{1m} \sin \varphi_{1m} \sum_{n=1}^N I_{1n} \cos \psi_{1n} - \sum_{m=1}^M U_{1m} \sin \varphi_{1m} \sum_{n=1}^N I_{1n} \cos \psi_{1n} \right] \times \sin(k\Omega t); \quad (6)$$

– для индуктивности:

$$P_{0\Sigma} = 0; \quad (7)$$

$$P_{kaL\Sigma} = L_i \frac{\Omega}{2} \left(\begin{aligned} & \sum_{m=1}^M k I_{im} \cos \psi_{im} \sum_{\substack{n=1 \\ k=m+n, m<n}}^N I_{in} \sin \psi_{in} + \\ & + \sum_{m=1}^M k I_{im} \cos \psi_{im} \sum_{\substack{n=1 \\ k=|m-n|, m<n}}^N I_{in} \sin \psi_{in} + \\ & + \sum_{m=1}^M k I_{im} \sin \psi_{im} \sum_{\substack{n=1 \\ k=m+n}}^N I_{in} \cos \psi_{in} - \\ & - \sum_{m=1}^M k I_{im} \sin \psi_{im} \sum_{\substack{n=1 \\ k=|m-n|, m<n}}^N I_{in} \cos \psi_{in} + \\ & + \sum_{\substack{n=1 \\ k=2n}}^N \frac{k}{2} I_{in}^2 \sin(2\psi_{in}) \end{aligned} \right) \cos(k\Omega t); \quad (8)$$

$$P_{kbL\Sigma} = L_i \frac{\Omega}{2} \left(\begin{aligned} & - \sum_{m=1}^M k I_{im} \cos \psi_{im} \sum_{\substack{n=1 \\ k=m+n, m<n}}^N I_{in} \cos \psi_{in} - \\ & - \sum_{m=1}^M k I_{im} \cos \psi_{im} \sum_{\substack{n=1 \\ k=|m-n|, m<n}}^N I_{in} \cos \psi_{in} + \\ & + \sum_{m=1}^M k I_{im} \sin \psi_{im} \sum_{\substack{n=1 \\ k=m+n}}^N I_{in} \sin \psi_{in} - \\ & - \sum_{m=1}^M k I_{im} \sin \psi_{im} \sum_{\substack{n=1 \\ k=|m-n|, m<n}}^N I_{in} \sin \psi_{in} + \\ & + \sum_{\substack{n=1 \\ k=2n}}^N \frac{k}{2} I_{in}^2 \cos(2\psi_{in}) \end{aligned} \right) \sin(k\Omega t), \quad (9)$$

– для активного сопротивления:

$$P_{0R\Sigma} = R_i \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N f_R(v_n) I_{in}^2; \quad (10)$$

$$P_{kaR\Sigma} = \frac{1}{2} \left(\begin{aligned} & \sum_{m=1}^M 2 I_{im} \cos \psi_{im} \sum_{\substack{n=1 \\ k=m+n, m<n}}^N (f_R(v_m) + f_R(v_n)) I_{in} \cos \psi_{in} - \\ & - \sum_{m=1}^M 2 I_{im} \cos \psi_{im} \sum_{\substack{n=1 \\ k=|m-n|, m<n}}^N (f_R(v_m) + f_R(v_n)) I_{in} \cos \psi_{in} - \\ & - \sum_{m=1}^M 2 I_{im} \sin \psi_{im} \sum_{\substack{n=1 \\ k=m+n}}^N (f_R(v_m) + f_R(v_n)) I_{in} \sin \psi_{in} + \\ & + \sum_{m=1}^M 2 I_{im} \sin \psi_{im} \sum_{\substack{n=1 \\ k=|m-n|, m<n}}^N (f_R(v_m) + f_R(v_n)) I_{in} \sin \psi_{in} + \\ & + \sum_{\substack{n=1 \\ k=2n}}^N f_R(v_n) I_{in}^2 \cos(2\psi_{in}) \end{aligned} \right) \times (11)$$

$$\times R_i \cos(k\Omega t);$$

$$P_{kbR\Sigma} = \frac{1}{2} \left(\begin{aligned} & \sum_{m=1}^M 2 I_{im} \cos \psi_{im} \sum_{\substack{n=1 \\ k=m+n, m<n}}^N (f_R(v_m) + f_R(v_n)) I_{in} \sin \psi_{in} + \\ & + \sum_{m=1}^M 2 I_{im} \cos \psi_{im} \sum_{\substack{n=1 \\ k=|m-n|, m<n}}^N (f_R(v_m) + f_R(v_n)) I_{in} \sin \psi_{in} + \\ & + \sum_{m=1}^M 2 I_{im} \sin \psi_{im} \sum_{\substack{n=1 \\ k=m+n}}^N (f_R(v_m) + f_R(v_n)) I_{in} \cos \psi_{in} - \\ & - \sum_{m=1}^M 2 I_{im} \sin \psi_{im} \sum_{\substack{n=1 \\ k=|m-n|, m<n}}^N (f_R(v_m) + f_R(v_n)) I_{in} \cos \psi_{in} + \\ & + \sum_{\substack{n=1 \\ k=2n}}^N f_R(v_n) I_{in}^2 \sin(2\psi_{in}) \end{aligned} \right) \times (12)$$

$$\times R_i \sin(k\Omega t),$$

где I_{im} , I_{in} – амплитуды гармоник тока соответствующего контура порядка m и n ; φ_{1m} – фазовый сдвиг составляющих гармоник напряжения; ψ_{im} , ψ_{in} – фазовый сдвиг составляющих токов соответствующего контура; $f_R(v_m)$, $f_R(v_n)$ – функции зависимости активных сопротивлений от частоты тока соответствующего контура.

Учет потерь в стали достигается введением в контур намагничивания активного сопротивления, которое нелинейно зависит от частоты тока [4]:

$$R_\mu(v) = R_\mu \cdot v^\alpha, \quad (13)$$

где R_μ – сопротивление контура намагничивания при номинальной частоте; v – относительная частота; α – постоянный коэффициент, зависящий от состояния пакета стали.

Сопротивление вторичного контура зависит от эффекта вытеснения и может быть представлено зависимостью [4]:

$$R'_2(v, \beta) = R'_{20} \cdot (1 + \beta \cdot v^2) / s_v, \quad (14)$$

где R'_{20} – сопротивление ротора при частоте, равной нулю; β – коэффициент, определяющий влияние эффекта вытеснения; s_v – скольжение двигателя, зависящее от частоты:

$$s_v = 1 - \frac{s_1}{v}, \quad (15)$$

s_1 – скольжение двигателя на первой гармонике.

Исходя из вышеизложенного, функции зависимости активных сопротивлений от частоты тока соответствующего контура имеют вид:

– для первичной цепи:

$$f_R(v_n) = 1;$$

– для контура намагничивания:

$$f_R(v_n) = v^\alpha;$$

– для вторичної цепи:

$$f_R(v_n) = (1 + \beta \cdot v^2) / s_v.$$

С учетом вышеизложенного, использование трех гармоник напряжения и тока позволяет получить следующие составляющие мгновенной мощности (принято, что $\phi_{1m} = 0$):

– для источника полигармонического напряжения:

$$P_{0и\Sigma} = \frac{1}{2} [U_1 I_{1a1} + U_{13} I_{1a3} + U_{15} I_{1a5}]; \quad (16)$$

$$P_{2ан\Sigma} = \frac{1}{2} \left[\frac{U_1 I_{1a1} + U_{13} I_{1a3} + U_{15} I_{1a1} + U_{13} I_{1a5} + U_{15} I_{1a3}}{2} \right] \cos(2\Omega t); \quad (17)$$

$$P_{2bn\Sigma} = \frac{1}{2} \left[\frac{U_1 I_{1b1} + U_{13} I_{1b3} - U_{15} I_{1b1} + U_{13} I_{1b5} - U_{15} I_{1b3}}{2} \right] \sin(2\Omega t); \quad (18)$$

$$P_{4ан\Sigma} = \frac{1}{2} \left[\frac{U_1 I_{1a3} + U_{13} I_{1a5} + U_{15} I_{1a1}}{2} \right] \cos(4\Omega t); \quad (19)$$

$$P_{4bn\Sigma} = \frac{1}{2} \left[\frac{U_1 I_{1b3} + U_{13} I_{1b5} + U_{15} I_{1b1}}{2} \right] \sin(4\Omega t); \quad (20)$$

$$P_{6ан\Sigma} = \frac{1}{2} [U_1 I_{1a5} + U_{13} I_{1a3} + U_{15} I_{1a1}] \cos(6\Omega t); \quad (21)$$

$$P_{6bn\Sigma} = \frac{1}{2} [U_1 I_{1b5} + U_{13} I_{1b3} + U_{15} I_{1b1}] \sin(6\Omega t); \quad (22)$$

$$P_{8ан\Sigma} = \frac{1}{2} [U_{13} I_{1a5} + U_{15} I_{1a3}] \cos(8\Omega t); \quad (23)$$

$$P_{8bn\Sigma} = \frac{1}{2} [U_{13} I_{1b5} + U_{15} I_{1b3}] \sin(8\Omega t); \quad (24)$$

$$P_{10ан\Sigma} = \frac{1}{2} [U_{15} I_{1a5}] \cos(10\Omega t); \quad (25)$$

$$P_{10bn\Sigma} = \frac{1}{2} [U_{15} I_{1b5}] \sin(10\Omega t); \quad (26)$$

– для активного сопротивления:

$$P_{0R\Sigma} = \frac{1}{2} [I_{1a1}^2 + I_{1b1}^2 + I_{1a3}^2 + I_{1b3}^2 + I_{1a5}^2 + I_{1b5}^2]; \quad (27)$$

$$P_{2aR\Sigma} = R_i \frac{1}{2} \left[\frac{(f_R(v_1) + f_R(v_3))(I_{1a1} I_{1a3} + I_{1b1} I_{1b3}) + (f_R(v_3) + f_R(v_5))(I_{1a3} I_{1a5} + I_{1b3} I_{1b5}) + (f_R(v_1) I_{1a1}^2 - f_R(v_1) I_{1b1}^2)}{2} \right] \times \cos(2\Omega t); \quad (28)$$

$$P_{2bR\Sigma} = R_i \frac{1}{2} \left[\frac{(f_R(v_1) + f_R(v_3))(I_{1a1} I_{1b3} - I_{1a3} I_{1b1}) + (f_R(v_3) + f_R(v_5))(I_{1a3} I_{1b5} - I_{1a5} I_{1b3}) + (f_R(v_1) I_{1a1} I_{1b1})}{2} \right] \times \sin(2\Omega t); \quad (29)$$

$$P_{4aR\Sigma} = R_i \frac{1}{2} \left[\frac{(f_R(v_1) + f_R(v_3))(I_{1a1} I_{1a3} - I_{1b1} I_{1b3}) + (f_R(v_1) + f_R(v_5))(I_{1a1} I_{1a5} + I_{1b1} I_{1b5})}{2} \right] \times \cos(4\Omega t); \quad (30)$$

$$P_{4bR\Sigma} = R_i \frac{1}{2} \left[\frac{(f_R(v_1) + f_R(v_3))(I_{1a1} I_{1b3} + I_{1a3} I_{1b1}) + (f_R(v_1) + f_R(v_5))(I_{1a1} I_{1b5} - I_{1a5} I_{1b1})}{2} \right] \times \sin(4\Omega t); \quad (31)$$

$$P_{6aR\Sigma} = R_i \frac{1}{2} \left[\frac{(f_R(v_1) + f_R(v_5))(I_{1a1} I_{1a5} - I_{1b1} I_{1b5}) + (f_R(v_3) I_{1a3}^2 - f_R(v_3) I_{1b3}^2)}{2} \right] \times \cos(6\Omega t); \quad (32)$$

$$P_{6bR\Sigma} = R_i \frac{1}{2} \left[\frac{(f_R(v_1) + f_R(v_5))(I_{1a1} I_{1b5} + I_{1a5} I_{1b1}) + (f_R(v_3) I_{1a3} I_{1b3})}{2} \right] \times \sin(6\Omega t); \quad (33)$$

$$P_{8aR\Sigma} = R_i \frac{1}{2} [(f_R(v_3) + f_R(v_5))(I_{1a3} I_{1a5} + I_{1b3} I_{1b5})] \times \cos(8\Omega t); \quad (34)$$

$$P_{8bR\Sigma} = R_i \frac{1}{2} [(f_R(v_3) + f_R(v_5))(I_{1a3} I_{1b5} + I_{1a5} I_{1b3})] \times \sin(8\Omega t); \quad (35)$$

$$P_{10aR\Sigma} = R_i \frac{1}{2} (f_R(v_5) I_{1a5}^2 - f_R(v_5) I_{1b5}^2) \cos(10\Omega t); \quad (36)$$

$$P_{10bR\Sigma} = R_i \frac{1}{2} (f_R(v_5) I_{1a5} I_{1b5}) \sin(10\Omega t); \quad (37)$$

– для индуктивности:

$$P_{0\Sigma} = 0; \quad (38)$$

$$P_{2aL\Sigma} = L_i \frac{\Omega}{2} \left[\frac{2I_{1a1} I_{1b1} + 2I_{1a1} I_{1b3} - 2I_{1b1} I_{1a3} + 2I_{1a3} I_{1b5} - 2I_{1b3} I_{1a5}}{2} \right] \cos(2\Omega t); \quad (39)$$

$$P_{2bL\Sigma} = L_i \frac{\Omega}{2} \left[\frac{-I_{1a1}^2 + I_{1b1}^2 - 2I_{1a1} I_{1b3} - 2I_{1b1} I_{1b3} - 2I_{1b3} I_{1a5} - 2I_{1b3} I_{1b5}}{2} \right] \sin(2\Omega t); \quad (40)$$

$$P_{4aL\Sigma} = L_i \frac{\Omega}{2} \left[\frac{4I_{1a1} I_{1b3} + 4I_{1a1} I_{1b5} + 4I_{1b1} I_{1a3} - 4I_{1b1} I_{1a5}}{2} \right] \cos(4\Omega t); \quad (41)$$

$$P_{4bL\Sigma} = L_i \frac{\Omega}{2} \left[\frac{-4I_{1a1} I_{1a3} - 4I_{1a1} I_{1a5} + 4I_{1b1} I_{1b3} - 4I_{1b1} I_{1b5}}{2} \right] \sin(4\Omega t); \quad (42)$$

$$P_{6aL\Sigma} = L_i \frac{\Omega}{2} \left[\frac{6I_{1a3} I_{1b3} + 6I_{1a1} I_{1b5} + 6I_{1b1} I_{1a5}}{2} \right] \cos(6\Omega t); \quad (43)$$

$$P_{6bL\Sigma} = L_i \frac{\Omega}{2} \left[\frac{-3I_{1a1}^2 + 3I_{1b1}^2 - 6I_{1a1} I_{1a5} + 6I_{1b1} I_{1b5}}{2} \right] \sin(6\Omega t); \quad (44)$$

$$P_{8aL\Sigma} = L_i \frac{\Omega}{2} (8I_{1a3} I_{1b5} + 8I_{1b3} I_{1a5}) \cos(8\Omega t); \quad (45)$$

$$P_{8bl\Sigma} = L_1 \frac{\Omega}{2} (-8I_{ia3} I_{ia5} + 8I_{ib3} I_{ib5}) \sin(8\Omega t); \quad (46)$$

$$P_{10al\Sigma} = L_1 \frac{\Omega}{2} (10I_{ia5} I_{ib5}) \cos(10\Omega t); \quad (47)$$

$$P_{10bl\Sigma} = L_1 \frac{\Omega}{2} (-5I_{ia5}^2 + 5I_{ib5}^2) \sin(10\Omega t), \quad (48)$$

где $I_{iam} = I_{im} \cos(\psi_{im})$, $I_{ibm} = I_{im} \sin(\psi_{im})$,
 $m = 1, 3, 5$.

Уравнения баланса мощностей при использовании трех гармоник напряжения и тока примут вид:

$$\begin{aligned} P_{0и\Sigma} &= P_{0R_1} + P_{0R_\mu} + P_{0R'_2}; \\ P_{2ai\Sigma} &= P_{2aR_1} + P_{2aR_\mu} + P_{2aR'_2} + P_{2aL_1} + \\ &+ P_{2aL_\mu} + P_{2aL'_2}; \\ P_{2bi\Sigma} &= P_{2bR_1} + P_{2bR_\mu} + P_{2bR'_2} + P_{2bL_1} + \\ &+ P_{2bL_\mu} + P_{2bL'_2}; \\ P_{4ai\Sigma} &= P_{4aR_1} + P_{4aR_\mu} + P_{4aR'_2} + P_{4aL_1} + \\ &+ P_{4aL_\mu} + P_{4aL'_2}; \\ P_{4bi\Sigma} &= P_{4bR_1} + P_{4bR_\mu} + P_{4bR'_2} + P_{4bL_1} + \\ &+ P_{4bL_\mu} + P_{4bL'_2}; \\ P_{6ai\Sigma} &= P_{6aR_1} + P_{6aR_\mu} + P_{6aR'_2} + P_{6aL_1} + \\ &+ P_{6aL_\mu} + P_{6aL'_2}; \\ P_{6bi\Sigma} &= P_{6bR_1} + P_{6bR_\mu} + P_{6bR'_2} + P_{6bL_1} + \\ &+ P_{6bL_\mu} + P_{6bL'_2}; \\ P_{8ai\Sigma} &= P_{8aR_1} + P_{8aR_\mu} + P_{8aR'_2} + P_{8aL_1} + \\ &+ P_{8aL_\mu} + P_{8aL'_2}; \\ P_{8bi\Sigma} &= P_{8bR_1} + P_{8bR_\mu} + P_{8bR'_2} + P_{8bL_1} + \\ &+ P_{8bL_\mu} + P_{8bL'_2}; \\ P_{10ai\Sigma} &= P_{10aR_1} + P_{10aR_\mu} + P_{10aR'_2} + P_{10aL_1} + \\ &+ P_{10aL_\mu} + P_{10aL'_2}; \\ P_{10bi\Sigma} &= P_{10bR_1} + P_{10bR_\mu} + P_{10bR'_2} + P_{10bL_1} + \\ &+ P_{10bL_\mu} + P_{10bL'_2}. \end{aligned} \quad (49)$$

Анализ приведенных уравнений баланса мощностей показывает, что для определения электромагнитных параметров асинхронного двигателя при Т-образной схеме замещения необходимо использовать три гармоники напряжения и тока, т.к. получается 11 составляющих мгновенной мощности при 11 неизвестных схемы замещения (сопротивление статора R_1 определяется заранее).

Требуемые значения гармоник напряжения и тока могут быть получены при использовании тиристорного регулятора напряжения [5]. Задавая угол управления на тиристорном регуляторе напряжения,

можно получить нужный спектр составляющих напряжения и тока.

Анализ гармонических составляющих напряжения и тока показывает, что значительное изменение этих составляющих наблюдается при углах управления в диапазоне от 75° до 150° (для исследований использовался асинхронный двигатель типа 4АХБ2П100L4) (рис. 2, 3).

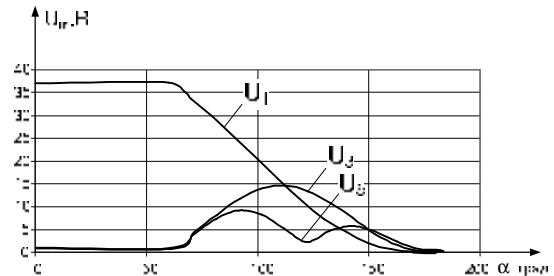


Рисунок 2 - Гармонические составляющие напряжения

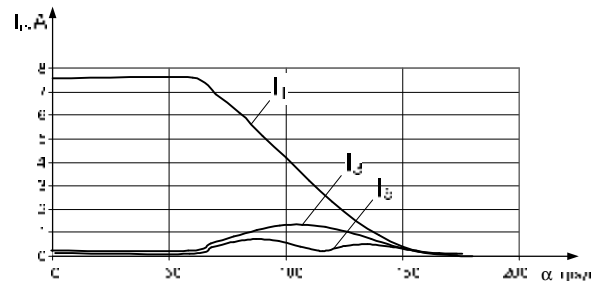


Рисунок 3 - Гармонические составляющие тока

Таким образом, с учетом вышеизложенного, наиболее целесообразно находить электромагнитные параметры электрической машины при больших углах управления $\left(\frac{\pi}{2} \div \frac{2\pi}{3}\right)$.

Мгновенная мощность включает в себя сумму двух составляющих – канонических и неканонических [3]. Канонические составляющие мгновенной мощности определяются путем перемножения одночастотных составляющих напряжения и тока (рис. 4, 5):

$$P_{k0ис} = U_n \cdot I_m \cos \varphi_m;$$

$$P_{kаис} = U_n \cdot I_m \cos \varphi_m \cdot \cos(k\Omega t);$$

$$P_{kвис} = U_n \cdot I_m \sin \varphi_m \cdot \sin(k\Omega t).$$

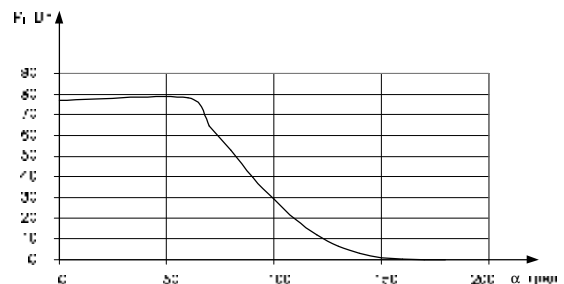


Рисунок 4 - Постоянная составляющая мгновенной мощности

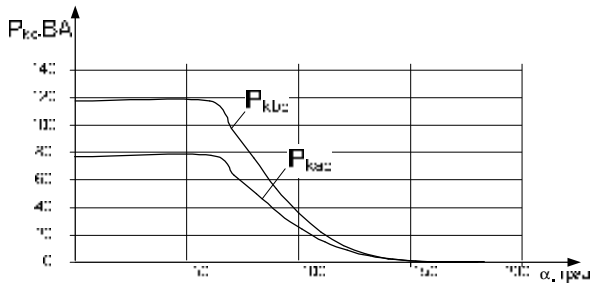


Рисунок 5 - Канонические составляющие мгновенной мощности

Произведение разночастотных составляющих напряжения и тока определяет составляющие мгновенной мощности неканонического порядка (рис. 6):

$$P_{k\text{аис}} = U_n \cdot I_m \cos \varphi_m \cdot \cos(k\Omega t);$$

$k=n\pm m, n \neq m$

$$P_{k\text{бис}} = U_n \cdot I_m \sin \varphi_m \cdot \sin(k\Omega t).$$

$k=n\pm m, n \neq m$

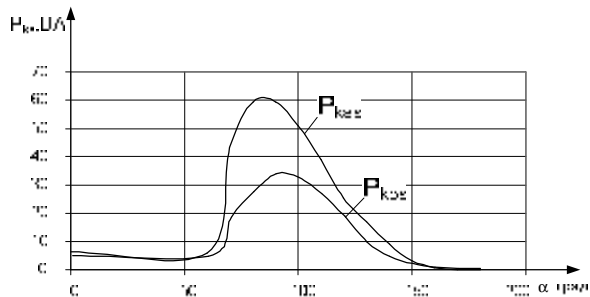


Рисунок 6 - Неканонические составляющие мгновенной мощности

Мгновенная мощность определится такими компонентами составляющих мгновенной мощности:

$$P_{0и\Sigma} = P_{0и\Sigma_c};$$

$$P_{каи\Sigma} = P_{каи\Sigma_c} + P_{каи\Sigma_s}; \quad (50)$$

$$P_{кби\Sigma} = P_{кби\Sigma_c} + P_{кби\Sigma_s}.$$

Аналогично можно получить канонические и неканонические составляющие мгновенной мощности на активном и индуктивном сопротивлениях, а также на нелинейных элементах электрической цепи:

– на активном сопротивлении:

$$P_R(t) = E(t) \cdot I(t) = (I(t) \cdot R) \cdot I(t); \quad (51)$$

– на индуктивности:

$$P_L(t) = E(t) \cdot I(t) = L \cdot \frac{d(I(t))}{dt} \cdot I(t); \quad (52)$$

– на нелинейном активном сопротивлении:

$$P_R(t) = E(t) \cdot I(t) = (I(t) \cdot R(t)) \cdot I(t); \quad (53)$$

– на нелинейной емкости:

$$P_C(t) = E(t) \cdot I(t) = \left(\int \frac{I(t)}{C(t)} dt \right) \cdot I(t); \quad (54)$$

– на нелинейной индуктивности:

$$P_L(t) = E(t) \cdot I(t) = \frac{d(I(t) \cdot L(t))}{dt} \cdot I(t). \quad (55)$$

Таким образом, можно получить составляющие мгновенной мощности на любом элементе электро-механической системы.

Из рис. 4 - 5 видно, что наибольшее изменение составляющих мгновенной мощности наблюдается при углах управления в диапазоне от 75° до 150°. Это значит, что наиболее целесообразно определение электромагнитных параметров асинхронного двигателя при указанных углах управления тиристорного преобразователя.

С учетом изложенного, ясно, что использование приведенной системы баланса мощностей на источнике и элементах схемы замещения позволяет определить электромагнитные параметры асинхронного двигателя. Ошибки при определении электромагнитных параметров асинхронного двигателя по методу полных уравнений мгновенной мощности не превышают более 3%. Определение электромагнитных параметров асинхронного двигателя производится при неподвижном роторе, т.е. при $s_v = 1$. Для оценки эффективности приведенного метода было определено влияние на точность определения электромагнитных параметров погрешностей входных величин – измеряемых сигналов напряжения и тока. Для этого в сигналы тока вводилась погрешность и определялось, каким образом эта погрешность повлияет на результат определения электромагнитных параметров. Как видно из рис. 7, при 10 % погрешности амплитуды тока, максимальная ошибка при определении электромагнитных параметров не превышает 6 %.

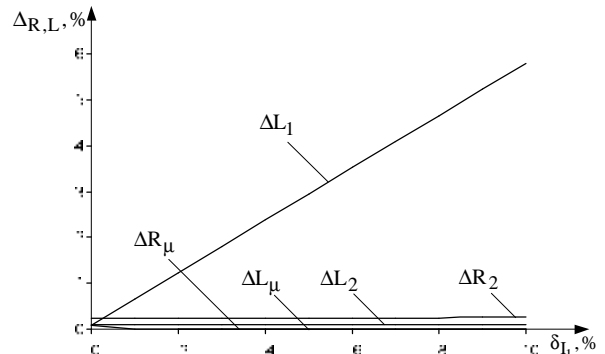


Рисунок 7 – Ошибки в отклонении электромагнитных параметров (%) при погрешности измерения тока первой гармоники (%)

Выводы. В основе математического описания процессов преобразования энергии находятся уравнения мгновенной мощности и баланса её составляющих. Развита коллективом авторов теория идентификации электрических параметров с использованием метода энергодиагностики, аналогов не имеет, являясь новой ветвью научных результатов для анализа процессов преобразования энергии.

Полные уравнения баланса мощности состоят из комплекса уравнений для всех гармонических составляющих мгновенной мощности: постоянной составляющей мощности (гармоники нулевой частоты), косинусных и синусных гармоник мощности разного порядка [5].

В работе получены выражения общего вида для составляющих мгновенной мощности с любым сочетанием частот напряжения и тока на характерных элементах схем замещения электрических машин. Полученные уравнения и результаты (4) - (12) могут быть использованы для решения большого класса электротехнических задач.

В исследованиях авторов показана возможность применения метода энергодиагностики в схемах с нелинейными элементами без их линеаризации. Применительно к электрическим машинам – это учет нелинейности кривой намагничивания, эффекта вытеснения тока и др. Исследования в данном направлении только начаты, но представляют очевидную перспективу.

Составление идентификационных уравнений с использованием составляющих мощности канонического и неканонического порядка, их эффективность при оценивании электромагнитных параметров, существенно зависят от уровней гармоник в кривых компонент, определяющих мгновенную мощность.

Предложенный метод оценивания параметров асинхронных машин эффективен в тех случаях, когда гармоники компонент наиболее существенны.

Возможные ошибки при идентификации параметров асинхронных двигателей с использованием метода уравнений энергобаланса на основании составляющих мгновенной мощности существенно ниже, чем в случае применения традиционных способов (зависимостей комплексных сопротивлений от частоты, уравнений электрического равновесия в совокупности с уравнением баланса активной мощности).

Уравнения для идентификации по энергетическим критериям менее чувствительны к отклонению измеряемых параметров и энергетического режима.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

1. Родькин Д.И. Уравнения баланса составляющих мгновенной мощности // Вісник КДПУ, 2006, вип. 4 (39), ч.1. С. 92-98.
2. 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.
3. Родькин Д.И. Принцип суперпозиции в процессах преобразования энергии // Вісник КДПУ, 2003, вип. 1, С. 80-85.
4. Родькин Д.И., Калинов А.П., Ромашихин Ю.В. Развитие частотных методов оценки параметров двигателей переменного тока // Вісник КДПУ, 2005, вип. 4 (33), С. 43-46.
5. Калинов А.П., Ромашихин Ю.В. Вентильные схемы для диагностики машин переменного тока // Міжнар. наук.-техн. конф. "Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика". Вісник НТУ "ХПІ". Зб. наук. праць. - №45. Харків: НТУ "ХПІ", 2005. - С. 459-462.
6. Котеленец Н.Ф., Кузнецов Н.Л., Испытания и надежность электрических машин. - М.: Высшая школа, 1988. - 231 с.
7. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники: Электрические цепи. Учебник для студентов электротехнических, энергетических и приборостроительных специальностей вузов - 7-е изд. перераб. и дополненное. - М.: Высш. шк., 1978. - 528 с.
8. Тонкаль В. Е., Новосельцев А. В., Денисюк С. П. и др. Баланс энергий в силовых цепях. - Киев: Наукова думка, 1992. - 312 с.