

В результаті експлуатації нововведеного проекту на протязі опалювального сезону в 2012–2013 рр. отримані наступні позитивні результати:

– значно зменшились витрати тепла при підвищенні середньої температури в будівлях університету на 5–6°C і, як результат, значна економія коштів за споживання теплової енергії;

– застосування нових приладів контролю теплової енергії зменшило динаміку нагріву теплоносія, і тим самим понизили витрати теплової енергії;

– система передбачає підключення додаткових потужностей для покращення комфортних умов в приміщеннях при аномальних зниженнях температури атмосфери.

Загальний економічний ефект по всіх об'єктах реконструкції за один опалювальний сезон склав 1,0 млн. грн.

Вартість проекту та його впровадження складає 1,2 млн. грн.

Стаття надійшла до редакції 12.09.2013

УДК 62 – 83 : 621.313.3

А.В. СТАЦЕНКО

Киевский национальный университет технологий и дизайна

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ В РЕГУЛИРУЕМЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

Статья посвящена определению подхода к расчету величины электромагнитных потерь в асинхронном двигателе для анализа эффективности использования различных алгоритмов управления электроприводом. Получены выражения для расчета мощности потерь при математическом моделировании работы двигателя. Определена зависимость КПД двигателя от скольжения и выполнено сравнение полученных результатов со справочными данными.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, электромагнитные потери

В современных электромеханических системах с асинхронными двигателями используются различные подходы к управлению, обеспечивающие требуемые свойства системы [1]. При этом к ним предъявляются требования по обеспечению высокой энергетической эффективности, что требует определения энергетических параметров электромеханической системы на этапе ее проектирования.

Основным энергетическим параметром системы является величина потерь энергии. В электромеханических системах с асинхронными двигателями присутствуют потери энергии в преобразователе частоты, электрической машине и механической передаче [1].

Потери в преобразователе частоты состоят из коммутационных потерь и активных потерь в силовых приборах: активные потери зависят от протекающего через них тока, а коммутационные потери – от протекающего тока и частоты переключений. Потери в двигателе упрощенно можно представить суммой [2]:

$$\sum P_n = P_{\sigma 1} + P_{\sigma 2} + P_{ст} + P_{мех} + P_{доб} + P_{гар} , \quad (1)$$

где $P_{\sigma 1}$, $P_{\sigma 2}$ – электрические потери в обмотках статора и ротора; $P_{ст}$ – потери в стали статора; $P_{мех}$ – механические потери; $P_{доб}$ – добавочные потери; $P_{гар}$ – гармонические потери.

Электрические потери в обмотках обусловлены протеканием по ним электрического тока. Потери в стали статора состоят из потерь на гистерезис и потерь от вихревых токов. Добавочные потери включают в себя потери от вихревых токов в обмотках, пульсационные потери в зубцах, потери в стали ротора, потери от потоков рассеяния, пульсаций индукции в воздушном зазоре и пр. Гармонические потери возникают от высших гармоник при несинусоидальной форме напряжения и тока статора. Механические потери в электрической машине и механической передаче обусловлены взаимодействием подвижных частей с неподвижными частями, присоединенными деталями и окружающей средой.

Необходимо учитывать, что механические потери определяются конструкцией электрической машины, типом механической передачи и частотой вращения, и не зависят от используемого алгоритма управления. Гармонические потери также не зависят от алгоритма управления, при этом их уменьшение требует повышения частоты переключений силовых приборов преобразователя частоты, что приводит к увеличению коммутационных потерь. Добавочные потери зависят от квадрата тока статора и могут достигать 1–2 % общей мощности. Поэтому можно сделать вывод, что использование различных алгоритмов управления влияет в первую очередь на электромагнитные потери в электрической машине, которые состоят из электрических потерь в обмотках и потерь в стали статора.

Объект и методы исследований. Объектом исследований являются электромагнитные потери энергии в асинхронном двигателе. При выполнении

исследований использовались методы теории электрических машин и методы математического моделирования.

Постановка задач. Основной задачей исследований является определение подхода к расчету величины электромагнитных потерь асинхронного двигателя при математическом моделировании различных режимов его работы.

Результаты и их обсуждение. Для анализа величины потерь энергии в математическую модель двигателя вводят дополнительные элементы. Для моделирования установившихся процессов используют схемы замещения [3], в которых электрические потери в обмотках статора и ротора учитываются активными сопротивлениями статора и ротора, а потери в стали учитывают с помощью дополнительного активного сопротивления, которое включается параллельно индуктивности намагничивания [4,5] (рис.1). Сопротивления статора и ротора являются постоянными и их значения приведены в справочной литературе [6]. Величина сопротивления, учитывающего потери в стали, не является постоянной. Для его экспериментального определения проводят ряд измерений на холостом ходу при разных частотах и величинах питающего двигатель напряжения, а затем производят расчет величины сопротивления [7].

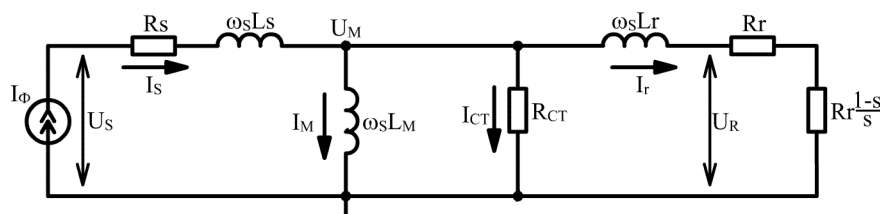


Рис.1. Схема замещения фазы двигателя учитывающая потери в стали

Однако для предварительной оценки качества работы системы на этапе ее проектирования величину данного сопротивления необходимо рассчитать. Для этого можно воспользоваться методикой по определению мощности потерь в стали [8] с использованием справочных данных о конструкции электрической машины [6].

Согласно этой методике основные потери в стали определяются как:

$$P_{ст.очн} = p_{1.0/50} \left(\frac{f_1}{50}\right)^\beta (k_{\delta a} B_a^2 m_a + k_{\delta z} B_{z1cp}^2 m_{z1}), \quad (2)$$

где $p_{1.0/50}$ – удельные потери при индукции 1 Тл и частоте 50 Гц, Вт/кг ($p_{1.0/50}=2.5$ Вт/кг); β – показатель степени, учитывающий зависимость потерь в стали от частоты перемагничивания ($\beta=1.3 - 1.5$); $k_{\delta a}$, $k_{\delta z}$ – коэффициенты, учитывающие влияние на потери в стали неравномерности распределения потока по сечениям участков

магнитопровода и технологических факторов ($k_{\delta a}=1.6$, $k_{\delta z}=1.8$); B_a , B_{z1cp} – индукция в ярме и средняя индукция в зубцах статора, Тл; m_a , m_{z1} – масса стали ярма и зубцов статора, кг; f_1 – частота перемагничивания, Гц.

Массы стали ярма и зубцов определяются как:

$$m_a = \pi(D_a - h_a)h_a l_{cm1} k_{cl} \gamma_c, \quad m_{z1} = h_{z1} b_{z1cp} Z_1 l_{cm1} k_{cl} \gamma_c, \quad (3)$$

где D_a – внешний диаметр статора, м; h_a – высота ярма статора, м; l_{cm1} – длина стали сердечников статора, м; k_{cl} – коэффициент заполнения сталью магнитопроводов статора и ротора; γ_c – удельная масса стали, кг*м³; h_{z1} – высота зубца статора, м; b_{z1cp} – средняя ширина зубца статора, м; Z_1 – число пазов статора.

Индукция в ярме статора определяется следующим образом:

$$B_a = \frac{\Phi}{2h_a l_{cm1} k_{cl}}, \quad \Phi = \frac{E_0}{4k_B w_1 k_{ob1} f_1}, \quad (4)$$

где Φ – магнитный поток, Вб; E_0 – ЭДС взаимоиндукции, В; k_e – коэффициент формы поля ($k_e=1.11$); w_1 – число витков в фазе обмотки; k_{ob1} – обмоточный коэффициент ($k_{ob1}=0.958$).

Средняя индукция в зубцах статора определяется как:

$$B_{z1cp} = \frac{B_\delta t_l l_\delta}{b_{z1cp} l_{cm1} k_{cl}}, \quad (5)$$

где B_δ – индукция в воздушном зазоре, Тл; t_l – зубцовое деление статора, м; l_δ – расчетная длина магнитопровода, м (равна l_{cm1}).

Индукция в воздушном зазоре определяется в соответствии со следующей формулой:

$$B_\delta = \frac{p \cdot \Phi}{D \cdot l_\delta}, \quad (6)$$

где D – внутренний диаметр статора, м; p – число пар полюсов.

По справочным значениям можно для конкретной машины определить массу стали зубцов и ярма. Индукция в ярме и индукция в зубцах, зависят от величины магнитного потока, который пропорционален ЭДС взаимоиндукции и обратно пропорционален частоте. Подставив в (2) все последующие формулы, можно увидеть, что величина потерь зависит только от двух переменных: ЭДС взаимоиндукции и частоты перемагничивания:

$$P_{cm,осн} = K_{cm} f_1^\beta \frac{E_0^2}{f_1^2} = K_{cm} \frac{E_0^2}{f_1^{2-\beta}}. \quad (7)$$

При подключении активного сопротивления, которое учитывает потери в стали, параллельно индуктивности намагничивания, мощность, выделяемая на нем, будет прямо пропорциональна квадрату напряжения и обратно пропорциональна величине сопротивления. Учитывая то, что напряжение на данном сопротивлении равно ЭДС взаимоиндукции, можно записать:

$$\frac{E_0^2}{R_{cm}} = K_{cm} \frac{E_0^2}{f_1^{2-\beta}}, \text{ откуда } R_{cm} = \frac{f_1^{2-\beta}}{K_{cm}} \quad (8)$$

Таким образом, сопротивление, которое эквивалентно отражает потери в стали, пропорционально частоте входного напряжения в степени от 0.5 до 0.7.

Соотношения между электрическими параметрами двигателя в установившихся режимах определяются из векторной диаграммы двигателя (рис.2).

Аналитическое описание связи тока статора с током ротора для двигательного режима имеет следующий вид:

$$I_s = I_r \sqrt{\frac{\left(\frac{R_r}{s} R_{cm} + \frac{R_r^2}{s^2} + \omega_s^2 L_r^2\right)^2}{R_{cm}^2 \left(\frac{R_r^2}{s^2} + \omega_s^2 L_r^2\right)} + \frac{\left(\omega_s^2 L_M L_r + \frac{R_r^2}{s^2} + \omega_s^2 L_r^2\right)^2}{\omega_s^2 L_M^2 \left(\frac{R_r^2}{s^2} + \omega_s^2 L_r^2\right)}} \quad (9)$$

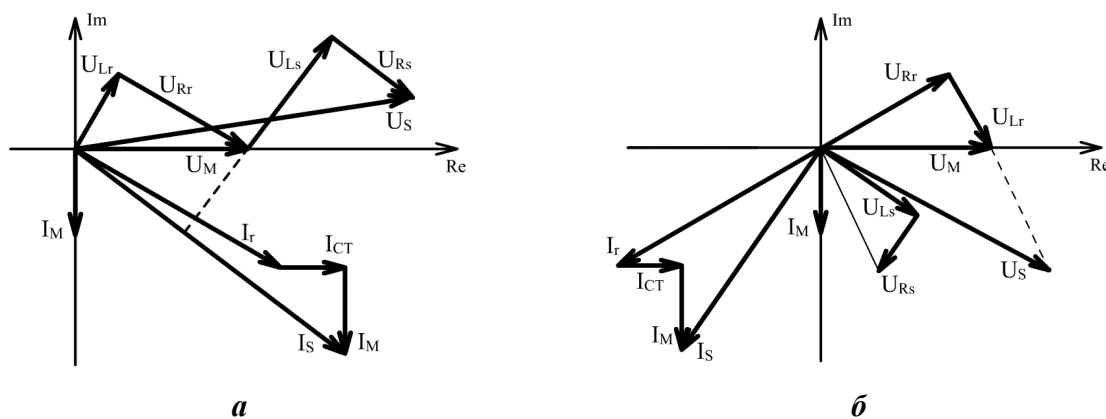


Рис.2. Векторные диаграммы для двигательного (а) и генераторного режимов работы (б)

При генераторном режиме работы скольжение отрицательно, и зависимость имеет вид:

$$I_s = I_r \sqrt{\frac{\left(\frac{R_r}{s} R_{cm} - \frac{R_r^2}{s^2} - \omega_s^2 L_r^2\right)^2}{R_{cm}^2 \left(\frac{R_r^2}{s^2} + \omega_s^2 L_r^2\right)} + \frac{\left(\omega_s^2 L_M L_r + \frac{R_r^2}{s^2} + \omega_s^2 L_r^2\right)^2}{\omega_s^2 L_M^2 \left(\frac{R_r^2}{s^2} + \omega_s^2 L_r^2\right)}} \quad (10)$$

При подстановке в (10) отрицательного значения скольжения, благодаря возведению в квадрат числителя первой дроби, результат полностью совпадает с (9).

Комплексное значение сопротивления схемы замещения одной фазы двигателя имеет вид:

$$Z_{AD}(j\omega) = R_s + j\omega_s L_s + \left(\frac{1}{j\omega_s L_M} + \frac{1}{R_{cm}} + \frac{1}{\frac{R_r}{s} + j\omega_s L_r} \right)^{-1}, \quad (11)$$

а абсолютное значение:

$$Z_{AD} = \sqrt{\left(R_s + \frac{\left(\frac{R_r^2}{s^2} + \omega_s^2 L_r^2 \right) R_{cm} \omega_s^2 L_M^2 \left(\frac{R_r}{s} R_{cm} + \frac{R_r^2}{s^2} + \omega_s^2 L_r^2 \right)}{\omega_s^2 L_M^2 \left(\frac{R_r}{s} R_{cm} + \frac{R_r^2}{s^2} + \omega_s^2 L_r^2 \right)^2 + R_{cm}^2 \left(\omega_s^2 L_r L_M + \frac{R_r^2}{s^2} + \omega_s^2 L_r^2 \right)^2} \right)^2 + \left(\omega_s L_s + \frac{R_{cm}^2 \left(\omega_s^2 L_r L_M + \frac{R_r^2}{s^2} + \omega_s^2 L_r^2 \right) \left(\frac{R_r^2}{s^2} + \omega_s^2 L_r^2 \right) \omega_s L_M}{\omega_s^2 L_M^2 \left(\frac{R_r}{s} R_{cm} + \frac{R_r^2}{s^2} + \omega_s^2 L_r^2 \right)^2 + R_{cm}^2 \left(\omega_s^2 L_r L_M + \frac{R_r^2}{s^2} + \omega_s^2 L_r^2 \right)^2} \right)^2}. \quad (12)$$

Значение электромагнитных потерь определяется как тепловая мощность, выделяемая на резисторах R_s , R_r , R_{CT} (рис.1) в трех фазах, которые определяется в соответствии с выражениями:

$$P_s = I_s^2 \cdot R_s, \quad P_r = I_r^2 \cdot R_r, \quad P_{cm} = \frac{U_M^2}{R_{cm}}, \quad \text{где } U_M = I_r \cdot \sqrt{\left(\frac{R_r}{s} \right)^2 + \omega_s \cdot L_r^2} \quad (13)$$

Для проверки корректности полученных выражений рассчитаем зависимости электромагнитного момента и коэффициента полезного действия двигателя при питании от источника синусоидального напряжения с действующим значением 220 В и частотой 50 Гц от скольжения.

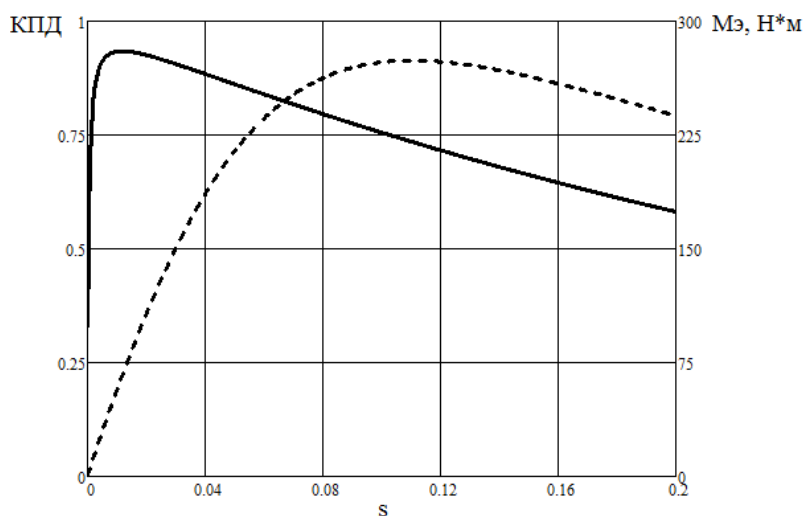


Рис.3. Зависимости электромагнитного момента и КПД от скольжения (сплошная линия – КПД, пунктир – электромагнитный момент)

Расчет будем проводить для двигателя 4A160M4У3 с параметрами [6]: $R_s = 0.264$ Ом, $R_r = 0.151$ Ом, $L_s = 1.7$ мГн, $L_r = 2.6$ мГн, $L_M = 88$ мГн, $p = 2$, $\Delta s_{ном} = 1.1$ Гц, $n_c = 1500$ об/мин, $P_{ном} = 18.5$ кВт. Сопротивление R_{cm} в соответствии с выражениями (2–8) для данного случая можно рассчитать по справочным данным, в результате получим $R_{cm} = 424$ Ом. Результаты расчета приведены на рис.3.

Расчет КПД осуществлялся как отношение полезной мощности на валу к сумме мощности на валу и мощности электромагнитных потерь (13) в трех фазах. В табл.1 приведены справочные данные и расчетные данные КПД для ряда значений электромагнитного момента.

Таблица 1.

$M_{\Delta}/M_{ном}, \%$	25	50	75	100	125
КПД _{спр} , %	87.5	90.5	90.5	89.5	87.5
КПД _{расч} , %	91.3	93.4	93	92	90.6

Отличия в расчетных и справочных значениях КПД обусловлены отсутствием учета добавочных и механических потерь в двигателе. Механические потери для заданного типа двигателя при неизменной скорости будут постоянными, а добавочные потери – пропорциональны квадрату тока статора. Если принять добавочные потери ($P_{доб.ном.}$) равными 2% от номинальной мощности при 100% нагрузке, а механические потери ($P_{мех.пот.}$) принять равными 1% от номинальной мощности, то можно провести уточненный расчет КПД:

$$\eta(s) = \frac{P_{мех}(s)}{P_{мех}(s) + P_{эл.магн.пот.}(s) + P_{мех.пот.} + P_{доб.ном.} \cdot \left(\frac{I_s}{I_{Sном}} \right)^2}. \quad (14)$$

Результаты расчета приведены в табл.2.

Таблица 2.

$M_{\Delta}/M_{ном}, \%$	25	50	75	100	125
КПД _{расч} , %	87.5	90.8	90.6	89.5	87.9

Как видно из приведенных результатов, отличия расчетных данных от справочных не превышают 0.5 %.

Выводы. В результате проведенных исследований определен подход и получены аналитические выражения для расчета величины электромагнитных потерь в асинхронном двигателе. Данный подход может быть использован для предварительной

оценки энергетической эффективности использования алгоритмов управления электроприводом на этапе их разработки.

Список использованной литературы

1. Leonhard W. Control of electrical drives / Leonhard W. – Springer, 2001. – 470 p.
2. Булгаков А.А. Частотное управление асинхронными двигателями / Булгаков А.А. – М.: Энергоиздат, 1982, – 216 с.
3. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин / Копылов И.П. – [2-е изд.]. – М.: Высшая школа, 1994. – 318 с.
4. Вольдек А.И. Электрические машины [Учебник для электротехнических специальностей вузов] / Вольдек А.И. – [3-е изд. перераб.]. – Л.: Энергия, 1978. – 832с.
5. Efficiency-optimized control of medium-size induction motor drives / F. Abrahamsen, F. Blaabjerg, J.K. Pedersen, P.V. Thøgersen // IEEE Transactions on industry applications. – 2001. – Vol. 37, № 6. – P. 1761-1767.
6. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник / А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф, В.И. Афонин, Е.А. Соболенская. – М.: Энергоиздат, 1982. – 504 с.
7. Виноградов А.Б. Учёт потерь в стали, насыщения и поверхностного эффекта при моделировании динамических процессов в частотно-регулируемом асинхронном электроприводе / А.Б.Виноградов // Электротехника. – 2005. – №5. – С. 57-62.
8. Проектирование электрических машин: Учеб. для вузов. / [Копылов И.П., Клоков Б.К., Морозкин В.П., Токарев Б.Ф.]; под ред. И.П. Копылова. – [2-е изд. перераб. и доп.]. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 464 с.

Стаття надійшла до редакції 12.11.2013

Розрахунок електромагнітних втрат енергії в регульованих асинхронних двигунах с короткозамкненим ротором

Стаценко О.В.

Київський національний університет технологій та дизайну

Стаття присвячена визначенню підходу до розрахунку величини електромагнітних втрат в асинхронному двигуні для аналізу ефективності використання різних алгоритмів керування електроприводом. Отримані вирази для розрахунку потужності втрат під час математичного моделювання роботи двигуна. Визначена залежність ККД двигуна від ковзання та виконано порівняння отриманих результатів із довідниковими даними.

Ключевые слова: асинхронний двигун, електромагнітні втрати.

Calculation of electromagnetic energy loss in controlled squirrel-cage induction motor

Statsenko A.

Kyiv national university of technologies and design

The article is devoted to the definition of an approach to calculating the amount of electromagnetic losses in the induction motor to analyze the effectiveness of using different motor control algorithms. The expressions for calculating the power dissipation while the motor operation mathematical modeling are obtained. The dependence of the motor efficiency from the slip is defined and comparison of the received results with reference data is performed.

Key words: induction motor, electromagnetic losses.

УДК 747.012

О.О. САФРОНОВА

Київський національний університет технологій та дизайну

**АЛЬТЕРНАТИВНІ МЕТОДИ ОСВІТЛЕННЯ В КОНТЕКСТІ
ВИРІШЕННЯ ПИТАННЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ
ІНТЕР'ЄРНОГО ПРОСТОРУ ВНЗ**

У роботі розглядається концепція підвищення енергоефективності вищих навчальних закладів за рахунок використання енергозберігаючих технологій освітлення на базі світлодіодних приладів з врахуванням типологічних особливостей формування структури архітектурного простору цих закладів.

Ключові слова: енергозберігаючі технології освітлення, поліфункціональні учбові комплекси, енергоефективність вищих навчальних закладів, світлодіодні прилади освітлення.

Постановка проблеми. Визнання енергозбереження як однієї з основних засад реалізації державної енергетичної політики є на сьогодні загальним для всіх розвинених країн світу. За даними [1,2] реалізація програм підвищення ефективності використання енергоресурсів у промисловості та активна популяризація заходів енергозбереження серед населення дозволили значно скоротити споживання енергоресурсів у країнах ЄС. В той же час стан енергетичної безпеки України оцінюється як далекий від оптимального. Для оцінки економічної ефективності енергозберігаючих заходів в Україні використовуються наступні показники: на рівні держави – величина зниження енергоємності ВВП, на регіональному (обласному) рівні – величина зниження енергоємності ВДВ, на рівні підприємства – величина економії ПЕР. Максимізація зазначених показників на кожному рівні є критерієм оптимального вибору