

УДК 62-83

## ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕЕ УПРАВЛЕНИЕ АСИНХРОННОЙ МАШИНОЙ ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ

*Зеленов А.Б., д.т.н., проф., Шевченко И.С., к.т.н., доц., Морозов Д.И., к.т.н.  
Донбасский государственный технический университет  
94204, г. Алчевск, пр. Ленина, 16  
E-mail: [dimorozov@mail.ru](mailto:dimorozov@mail.ru)*

У даній статті наведені результати дослідження сумарних втрат при різних режимах збудження асинхронної машини, керованої по ротору. Показано, що режим перезбудження з боку ротора супроводжується збільшенням втрат у сталі статора.

**Ключові слова:** асинхронний двигун, насичення стали, реактивна енергія.

The article presents the results of total losses research at different modes of excitation of the asynchronous machine regulated with a rotor. It is shown that the mode of overexcitation from the rotor is accompanied by increasing in stator iron losses.

**Key words:** induction motor, saturation of steel, reactive energy.

**Введение.** Применение преобразователя частоты в роторе асинхронного двигателя позволяет получить высокорегулируемый привод с возможностью регулирования реактивной энергии. Возможность регулирования реактивной мощности энергетически независимо от активной раскрывает ряд вопросов поиска целесообразного соотношения токов статора и ротора – в частности их реактивных составляющих. Оптимальное значение токов имеет смысл искать с позиций минимальных потерь в приводе в целом и в двигателе в частности.

В работе [1] авторами с позиций минимизации потерь в меди обмоток показано, что оптимальным будет режим, при котором возбуждение будет производиться как со стороны статора, так и ротора, причем это распределение определяется соотношением сопротивлений фаз статора и ротора и не зависит от активной мощности, потребляемой приводом.

Однако при рассмотрении работы машины в [1] было принято допущение о неизменности модуля тока намагничивания при изменении нагрузки и режима возбуждения. В реальности же поток машины при увеличении возбуждения со стороны ротора будет изменяться. В результате получаем следующую картину: с одной стороны, при увеличении реактивного тока ротора уменьшаются суммарные потери в меди, но с другой – увеличивается поток и растут потери в стали. Таким образом, функция суммарных потерь является экстремальной.

**Цель работы** – исследование изменения суммарных потерь в меди и стали асинхронной машины, питаемой со стороны ротора, при регулировании реактивной мощности.

**Материал и результаты исследования.** При исследовании будем считать, что регулирование реактивной мощности происходит при работе асинхронного двигателя на синхронной скорости. Примем допущение о линейности кривой намагничивания

и отсутствии насыщения стали машины.

Суммарная мощность потерь энергии в асинхронном двигателе определяется по выражению:

$$\Delta P_{\text{дв}} = \Delta P_{1\text{м}} + \Delta P_{2\text{м}} + \Delta P_{1\text{с}} + \Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{доб}}, \quad (1)$$

где  $\Delta P_{1\text{м}}$ ,  $\Delta P_{2\text{м}}$  – потери в меди статора и ротора;

$\Delta P_{1\text{с}}$  – потери в стали статора;  $\Delta P_{\text{мех}}$  – механические потери;  $\Delta P_{\text{доб}}$  – добавочные потери.

$$\Delta P_{1\text{м}} = |I_s|^2 R_s, \quad \Delta P_{2\text{м}} = |I_r|^2 R_r. \quad (2)$$

Потери в стали статора состоят из потерь на гистерезис и потерь от вихревых токов:

$$\Delta P_{1\text{с}} = \Delta P_{1\text{сг}} + \Delta P_{1\text{св}}; \quad (3)$$

$$\Delta P_{1\text{сг}} = \Delta P_{1\text{сгном}} \frac{\Psi_0^2}{\Psi_{0\text{ном}}^2} \frac{\omega_1}{\omega_{1\text{ном}}}; \quad (4)$$

$$\Delta P_{1\text{св}} = \Delta P_{1\text{свном}} \frac{\Psi_0^2}{\Psi_{0\text{ном}}^2} \frac{\omega_1^2}{\omega_{1\text{ном}}^2}, \quad (5)$$

где  $\Psi_0$  – модуль результирующего вектора главного потокоцепления [2].

Так как в рассматриваемом приводе статор подключен непосредственно к питающей сети, частота которой неизменна, суммарные потери в стали будут зависеть лишь от квадрата модуля потокоцепления:

$$\Delta P_{1\text{с}} = \Delta P_{1\text{сном}} \left( \frac{\Psi_0}{\Psi_{0\text{ном}}} \right)^2. \quad (6)$$

Потери в стали ротора в нашем случае не рассматриваем, так как, согласно принятому допущению, частота поля по отношению к ротору равна нулю.

Исследуем зависимость суммарных потерь от тока статора при изменении реактивной составляющей при различных нагрузках на примере двигателя

АК4-450 со следующими параметрами:  
 $P_H = 630$  кВт;  $U'_{1H} = 413,3$  В;  $n_H = 980$  об/мин;  
 $\eta_H = 93,4$  %; электрические параметры, приведен-

ные к ротору:  $R_s = 0,002$  Ом;  $R_r = 0,014$  Ом;  
 $L_m = 5,037$  мГн;  $L_s = 5,448$  мГн;  $L_r = 5,213$  мГн.

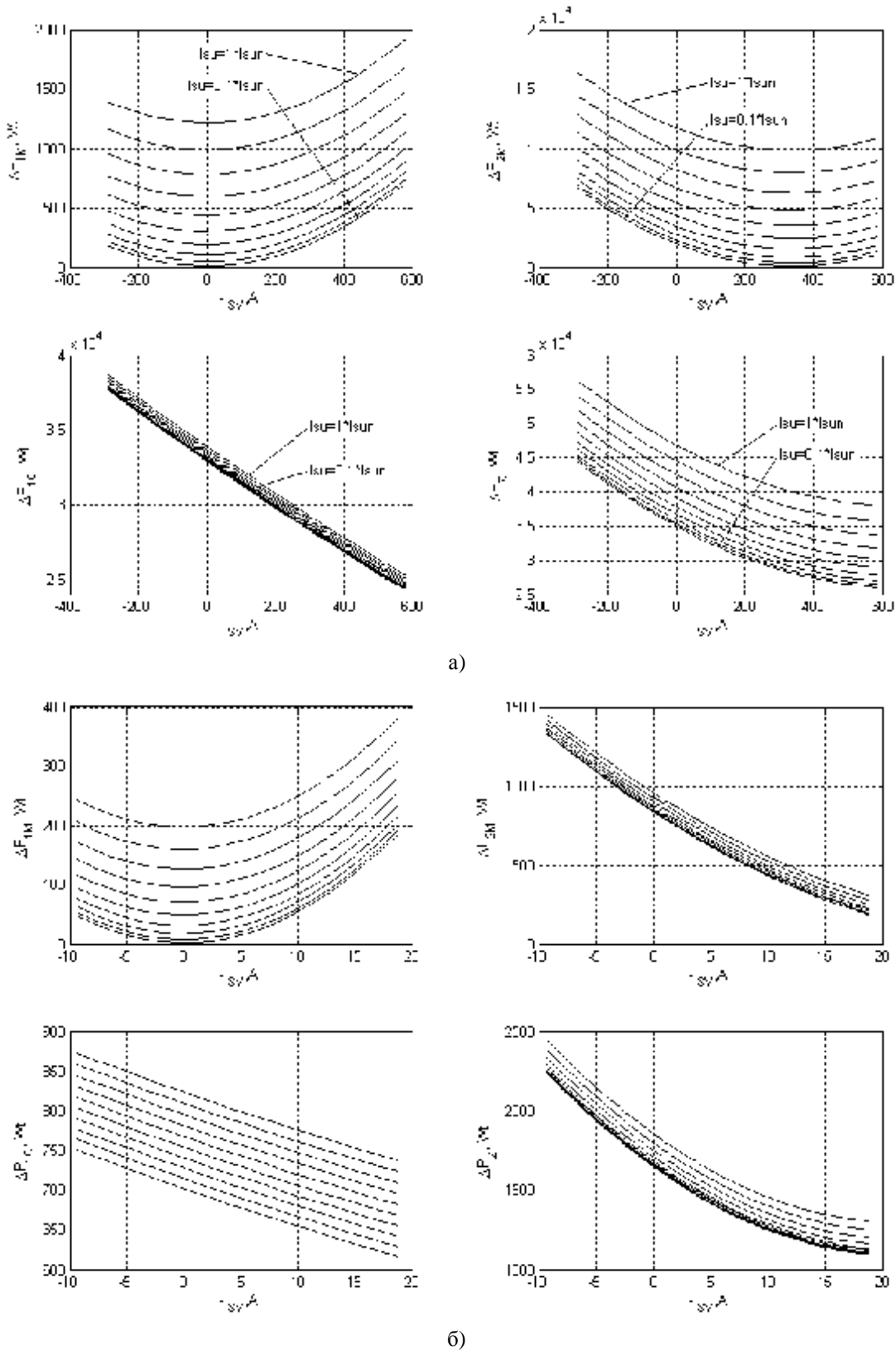


Рисунок 2 – Семейства зависимостей потерь от реактивной составляющей тока статора ( $I_{SV}$ ) при различных значениях активной составляющей:  
 а) для двигателя АК4-450 (630 кВт); б) для двигателя МТ-11-6 (2,2 кВт)

Для определения базовых величин рассмотрим величины потерь в номинальном режиме. Значения координат состояния определим в векторном виде как решение уравнений Парка-Горева при работе машины с короткозамкнутым ротором с номинальным скольжением. Номинальные значения токов и главного потокосцепления:

$$\vec{I}_s = \frac{\rho_H + jx_r}{R_s \rho_H - \sigma x_s x_r + j(x_s \rho_H + R_s x_r)} \vec{U}_s; \quad (7)$$

$$\vec{I}_r = -\frac{jx_m}{\rho_H + jx_r} \vec{I}_s; \quad \vec{I}_0 = \vec{I}_s + \vec{I}_r; \quad \vec{\Psi}_0 = L_m \vec{I}_0, \quad (8)$$

где  $\rho_H = R_r / s_H$ .

Принимая значение вектора  $\vec{U}_s$  действительным и равным амплитуде фазного напряжения, получим значения токов в комплексном виде, где мнимая составляющая соответствует реактивной составляющей (рис. 1). В результате номинальные значения модулей векторов токов и потокосцепления:

$$\begin{aligned} |\vec{I}_{SH}| &= |769,6 - j582,1| = 964,96 \text{ А}; \\ |\vec{I}_{rH}| &= |-837,7 - j265,9| = 878,93 \text{ А}; \\ |\vec{\Psi}_{0H}| &= |-0,343 - j1,593| = 1,629 \text{ Вб}. \end{aligned}$$

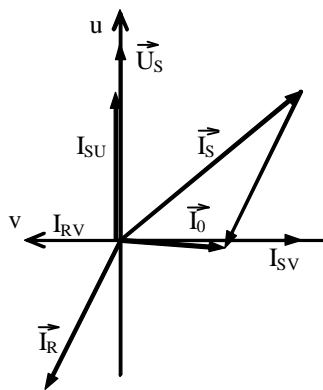


Рисунок 1 – Векторная диаграмма AM

Потери в номинальном режиме:

– суммарные потери:

$$\Delta P_H = P_H \frac{1 - \eta_H}{\eta_H} = 44,5 \text{ кВт};$$

– потери в меди статора и ротора:

$$\Delta P_{1MH} = 1,91 \text{ кВт}; \quad \Delta P_{2MH} = 10,8 \text{ кВт};$$

– добавочные потери:

$$\Delta P_{добн} = 0,005 P_H / \eta_H = 3,37 \text{ кВт};$$

– механические потери:

$$\Delta P_{мехн} = 0,005 P_H = 3,15 \text{ кВт};$$

– потери в стали статора:

$$\begin{aligned} \Delta P_{1сн} &= \Delta P_H - (\Delta P_{1MH} + \Delta P_{2MH} + \Delta P_{добн} + \Delta P_{мехн}) = \\ &= 25,26 \text{ кВт}. \end{aligned}$$

Для автоматизированного исследования задаемся значениями тока статора следующим образом: при

фиксированных активных составляющих (с шагом  $0,1 \text{ Re}(\vec{I}_{SH})$ ) задаемся реактивными составляющими в диапазоне  $(-0,5 \text{ Im}(\vec{I}_{SH}) : \text{Im}(\vec{I}_{SH}))$ . Вектор главного потокосцепления находим как:

$$\vec{\Psi}_0 = \frac{1}{j\omega_c} [\vec{U}_s - (R_s + jx_{cs}) \vec{I}_s]. \quad (7)$$

Ток ротора:

$$\vec{I}_r = \vec{\Psi}_0 / L_m - \vec{I}_s. \quad (8)$$

По приведенным выше выражениям определяем потери при каждом значении тока. Результаты приведены на рис. 2,а, где показаны зависимости потерь от реактивной составляющей тока статора при различных активных значениях. Как видно (рис. 2), зависимости потерь в меди статора и ротора от  $I_{SV}$  имеют экстремальный характер. При уменьшении  $I_{SV}$  и переходе в режим емкостной реактивной составляющей потери в стали статора ( $\Delta P_{1c}$ ) растут практически по линейному закону в связи с ростом потока. Суммарные потери ( $\Delta P_{\Sigma}$ ) также имеют экстремальный характер, однако экстремумы (минимумы) потерь расположены дальше допустимых значений реактивных составляющих токов статора и соответствуют глубокому недо возбуждению. Такой эффект связан с более сильным влиянием потерь в стали по отношению к потерям в меди. Так в номинальном режиме для рассматриваемого двигателя потери в стали составляют 56%. Подобный результат наблюдается и для двигателей малой и средней мощности (рис. 2, б.)

**Выводы.** В асинхронных приводах, регулируемых по ротору, критерий минимума потерь при выборе соотношения реактивных составляющих токов не дает приемлемого результата, поэтому выбор энергетического режима работы привода с точки зрения реактивной мощности должен производиться, исходя из требуемого коэффициента мощности. Однако регулирование коэффициента мощности в сторону уменьшения сопровождается повышением потерь в стали.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Мотченко А.И., Морозов Д.И., Полилов Е.В., Богатова Л.И. Концепция энергоэффективного управления асинхронной машиной по ротору // Сборник научных трудов Днепродзержинского гос. техн. ун-та. Тематический выпуск «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика». – Днепродзержинск: ДГТУ, 2007. – С. 132-133.
2. Энергосберегающий асинхронный электропривод: Уч. пос. / Под ред. И.Я. Браславского. – М.: Академия, 2004. – 256 с.

Статья надійшла 15.04.2008р.