

Н.В. Чуприна, С.В. Седых, А.А. Пугачев
(г. Брянск, Брянский государственный технический университет)
N.V. Chuprina, S.V. Sedykh, A.A. Pugachev (Bryansk, Bryansk State Technical University)

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ С АСИНХРОННЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЗАКОНАХ УПРАВЛЕНИЯ

COMPARATIVE ASSESSMENT OF ENERGY EFFICIENCY OF ELECTRIC DRIVES
WITH ASYNCHRONOUS ELECTRIC MOTORS AT VARIOUS CONTROL METHODS

Приведены основные энергетические показатели электроприводов при различных алгоритмах системы скалярного управления асинхронными двигателями. Получены зависимости потерь мощности в обмотках статора и ротора при различных способах управления, выполнен анализ полученных результатов.

The main energy indicators of electric drives with inductions motors and frequency converters are given for various algorithms of scalar control system of induction motors. The dependences of the power losses of the stator and rotor windings are obtained for various control methods, the analysis of the results is performed.

Ключевые слова: асинхронный электродвигатель, электропривод, энергоэффективность, потери, мощность, энергия.

Keywords: asynchronous electric motor, electric drive, energy efficiency, losses, power, energy.

В настоящий момент во многих отраслях промышленности электроприводы с асинхронными двигателями потребляют большую часть всей электроэнергии в стране [1]. При этом электрические двигатели приводов являются потребителями как активной, так и реактивной составляющих полной мощности, потребляемой из сети, которая расходуется совершение полезной работы и на потери в электромеханическом преобразователе. Исходя из этого, оценка потерь мощности в асинхронных электродвигателях и их минимизация, при различных способах управления и режимах работы, является одной из приоритетных задач вновь разрабатываемых и модернизируемых электроприводов.

Наиболее оптимальным и наглядным способом оценки потерь является использование математического моделирования электромеханических процессов в двигателе, описываемых с помощью дифференциальных уравнений.

Математическое описание переходных электромеханических процессов в асинхронном электродвигателе в системе координат, вращающихся с произвольной частотой ω_k , осуществляется на базе следующих уравнений [2]:

$$\left. \begin{aligned}
 \bar{i}_s &= R_s \bar{i}_s + L_{\sigma s} \frac{d\bar{i}_s}{dt} + \frac{d\bar{\psi}_\mu}{dt} + j\omega_k (\bar{\psi}_s + \bar{\psi}_\mu) \\
 0 &= R_r \bar{i}_r + L_{\sigma r} \frac{d\bar{i}_r}{dt} + \frac{d\bar{\psi}_\mu}{dt} + j(\omega_k - \omega)(\bar{\psi}_r + \bar{\psi}_\mu) \\
 R_c \bar{i}_c &= j\omega_k \bar{\psi}_\mu + \frac{d\bar{\psi}_\mu}{dt}, \quad \bar{i}_c + \bar{i}_\mu = \bar{i}_s + \bar{i}_r \\
 M &= \frac{3p_n}{2L_{\sigma r}} [(L_{\sigma r} i_{ru} + \psi_{\mu u})\psi_{\mu v} + (L_{\sigma r} i_{rv} + \psi_{\mu v})\psi_{\mu u}] \\
 M - M_c &= J \frac{d\omega}{dt}
 \end{aligned} \right\}$$

Явление насыщения по главному магнитному пути определяется из следующего равенства:

$$L_{\mu^*} = -0,002I_{\mu^*}^6 + 0,037I_{\mu^*}^5 - 0,261I_{\mu^*}^4 + 0,87I_{\mu^*}^3 - 1,278I_{\mu^*}^2 + 0,214I_{\mu^*} + 1,413$$

(индекс «*» указывает на относительное значение параметра).

Нелинейная зависимость потерь в стали от частоты:

$$R_c = \begin{cases} 88,3135 + 5,646f_s + 0,0534f_s^2, & f_s \leq 50 \text{Гц}, \\ 1261,3 - 37868/f_s, & f_s > 50 \text{Гц}. \end{cases}$$

При математическом моделировании для получения электромеханических и энергетических процессов наиболее близких к реальным необходимо учитывать эффект вытеснения тока, т.к. он оказывает существенное влияние на низких частотах. Выражения для активного и индуктивного сопротивлений имеют вид:

$$R_r = K_R R_{rn} + R_{rn}; \quad X_r = K_X X_{rn} + X_{rn}, \quad \text{где:}$$

R_{rn} и X_{rn} - сопротивления пазовой части обмотки, R_{rn} и X_{rn} - сопротивления участков короткозамыкающих колец между соседними стержнями, K_R и K_X - коэффициенты, учитывающие изменения активного и индуктивного сопротивлений стержня под влиянием эффекта вытеснения тока:

$$K_R = \xi \frac{sh2\xi + \sin 2\xi}{ch2\xi - \cos 2\xi}, \quad K_X = \frac{3}{2\xi} \cdot \frac{sh2\xi - \sin 2\xi}{ch2\xi - \cos 2\xi}, \quad \text{где } \xi = 2 \cdot \pi \cdot 10^{-3} \cdot h \cdot \sqrt{\frac{s \cdot f_1 \cdot b}{10 \cdot \rho \cdot b_n}} - \text{приведенная}$$

высота стержня, h - высота стержня, ρ - удельное сопротивление материала стержня, b - ширина стержня, b_n - ширина паза.

Потери в меди обмотки статора ΔP_{1M} [2]:

$$\Delta P_{1M} = P_{1M, \text{ном}} \frac{i_1^2}{i_{1\text{ном}}^2};$$

Потери в меди обмотки ротора ΔP_{2M} :

$$\Delta P_{2M} = \Delta P_{2M, \text{ном}} \frac{i_1^2}{i_{2\text{ном}}^2};$$

Потери в стали статора на гистерезис $\Delta P_{1c.g.}$ и вихревые токи $\Delta P_{1c.b.}$:

$$\Delta P_{1с.г.} = \Delta P_{1с.г.ном} \frac{\psi_0^2}{\psi_{0ном}^2} \frac{\omega_1}{\omega_{1ном}} ; \Delta P_{1с.в.} = \Delta P_{1с.в.ном} \frac{\psi_0^2}{\psi_{0ном}^2} \frac{\omega_1^2}{\omega_{1ном}^2}, \text{ где}$$

$\Delta P_{1с.г.ном}$, $\Delta P_{1с.в.ном}$ — потери в стали статора на гистерезис и вихревые токи в номинальном режиме; ψ_0 — модуль результирующего вектора главных потокосцеплений, $\psi_0 = (\psi_{0u}^2 + \psi_{0v}^2)^{1/2}$; ω_1 — угловая частота напряжения статора; $\psi_{0ном}$ и $\omega_{1ном}$ — значения модуля результирующего вектора главных потокосцеплений и угловой частоты напряжения статора в номинальном режиме.

Моделирование проводилось с помощью программного комплекса Matlab Simulink. Результаты моделирования показаны на рис. 1.

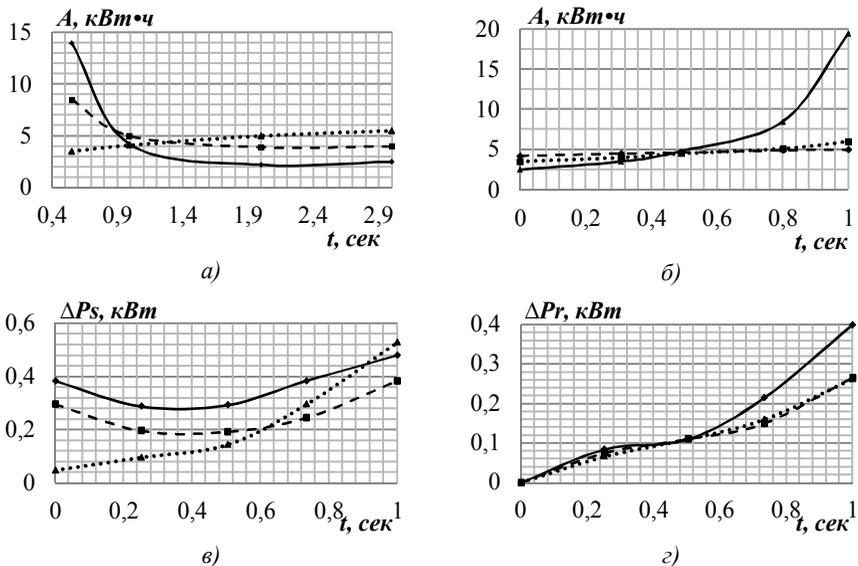


Рис. 1. Результаты моделирования в виде зависимостей: пусковых потерь энергии при вентиляторной нагрузке (а), пусковых потерь от момента сопротивления (б), мощности потерь в меди статора от момента (в), мощности потерь в меди ротора от момента (г).

Рис. (а), (б):

(---) Закон управления $U/f^2 = const$,

(—) Закон управления $U/f = const$,

••• - Импульсно-ключевой коммутатор)

Рис. (в), (г):

(---) iR - компенсация,

(—) iZ - компенсация,

••• - Закон управления $U/f = const$)

(*аналогично для Рис. 2)

На рис. 1(а) представлена зависимость потерь от времени пуска (0,5 - 3с) при различных способах пуска и вентиляторной нагрузке на валу двигателя. Можно отметить преимущество закона управления $U/f = const$ над законом $U/f^2 = const$ в некотором диапазоне времени пуска. Также при малом времени пуска более выгодно использовать импульсно-ключевое регулирование сопротивления в цепи ротора (ИКР), чем частотное управление.

На рис. 1(б) представлены зависимости потерь от величины момента сопротивления (0 - 1Мн) при различных способах пуска (при постоянной нагрузке). Очевидно преимущество закона управления $U/f=const$ над законом $U/f^2=const$ и ИКР в диапазоне нагрузок до 0,5Мн.

На рис. 1(в) представлены зависимости мощности потерь в меди статора от момента сопротивления (0 - 1Мн) при различных режимах управления при постоянной нагрузке. По кривым, представленным на рис. 5, можно судить о наименьшей мощности потерь энергии при использовании закона $U/f=const$, в диапазоне 0...0.8Мн.

На рис. 1(г) представлены зависимости мощности потерь в меди ротора от момента сопротивления (0 - 1Мн) при различных режимах управления при постоянной нагрузке. По графику (рис. 1) можно судить о наименьших потерях мощности при использовании iR или iZ - компенсации, во всем исследуемом диапазоне изменения момента.

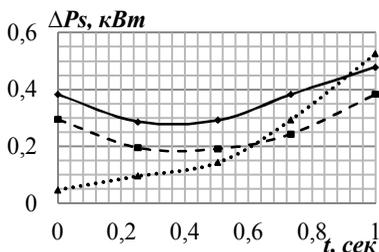


Рис. 2. Зависимость потерь мощности в стали статора от момента

На рис. 2 представлены зависимости мощности потерь в стали статора от момента сопротивления (0 - 1Мн) при различных режимах управления при постоянной нагрузке. По графикам можно судить о наименьших потерях мощности при использовании закона $U/f=const$ во всем диапазоне моментов нагрузки.

Анализ графиков, приведенных на рис. 1-2, показывает, что для каждого из исследуемых законов управления есть достаточно узкий диапазон изменения моментов в статическом режиме и времени пуска в динамическом режиме, в котором именно этот закон оказывается наиболее энергоэффективным, что говорит о необходимости создания высокодинамичных систем управления, позволяющих минимизировать потери энергии в широком диапазоне изменения момента и частоты вращения.

Список литературы

1. Космодамианский, А.С. Системы скалярного управления тяговым асинхронным двигателем / А.С. Космодамианский, В.И. Воробьев, А.С. Пугачев // Электротехника. – 2016. – № 9. – С. 44 – 50.
2. Иньков, Ю.М. Оптимизация энергетических характеристик электропривода вспомогательных механизмов тягового подвижного состава / Ю.М. Иньков, А.А. Пугачев // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2016. – № 6. – С. 43 – 47.

Материал поступил в редколлегию 21.10.19.