

УЧЕТ ЭФФЕКТА ВЫТЕСНЕНИЯ ТОКА В СТЕРЖНЯХ РОТОРА АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПРИ ЕГО МОДЕЛИРОВАНИИ В СРЕДЕ MATLAB

Каваре Ясер Хуссейн

Сумский государственный университет

cont_sys@sumdu.edu.ua

There is proposed a structure of subsystem accounting for the effect of current displacement in asynchronous electric drive rotor rods while researching its work conditions in MatLab medium. The use of the proposed structure gives a possibility for precise simulation of dynamic processes.

Известно, что для достижения хорошего КПД асинхронные двигатели (АД) должны иметь малое номинальное скольжение ($s_n \approx 0,02 \div 0,05$), в соответствии с чем активное сопротивление обмоток ротора у них должно быть достаточно мало. С другой стороны, анализ формулы Клосса [1] показывает, что пусковой момент двигателя при уменьшении сопротивления ротора также уменьшается, а это делает невозможным его пуск с номинальной нагрузкой. Таким образом возникла задача создания таких АД с короткозамкнутым ротором, у которых активное сопротивление обмотки ротора в начальный период пуска (при большом скольжении) достаточно велико и уменьшается при переходе к номинальному режиму работы. Эту задачу решают путём использования эффекта вытеснения тока в стержнях ротора, применяя обмотку специальной конструкции. Одной из разновидностей таких АД являются двигатели с глубокими пазами на роторе и высокими стержнями беличьей клетки. Вытеснение тока в стержнях клетки происходит в результате действия ЭДС, индуцируемых пазовыми потоками рассеяния Φ_δ . Можно представить себе, что стержень состоит из множества волокон, включённых параллельно. Нижние волокна охватываются большим, а нижние меньшим числом линий потока Φ_δ . При пуске, когда частота в роторе велика, в нижних волокнах стержня индуцируется большая ЭДС самоиндукции, чем в верхних, и плотность тока распределяется по высоте проводника неравномерно. Можно также сказать, что такое неравномерное распределение плотности тока обусловлено тем, что нижние волокна стержня имеют большее индуктивное сопротивление чем верхние. Таким образом ток в стержне вытесняется по направлению к воздушному зазору, что в сущности, и есть проявление поверхностного эффекта в проводниках, утопленных в ферромагнитную среду. В результате уменьшения площади эффективного сечения проводника активное сопротивление в стержнях ротора увеличивается, а индуктивное сопротивление рассеяния уменьшается, так как поток Φ_δ в нижней части стержня вследствие уменьшения в ней тока ослабляется. В результате увеличения активного и уменьшение индуктивного сопротивления рассеяния обмотки ротора уменьшается угол сдвига фаз между ЭДС стержня, индуцируемой вращающимся полем, и током стержня, что и приводит к увеличению пускового момента. По мере разбега АД частота тока в роторе уменьшается и по достижении номинальной скорости вращения становится весьма малой ($f_{2n} = s_n f_1 = 1 \div 5 \text{Гц}$). При этом ЭДС, индуцируемые потоком Φ_δ , становятся малыми, явление вытеснения тока в стержнях ротора исчезает, и ток распределяется равномерно по сечению стержня. Активное сопротивление стержня при этом становится малым и двигатель работает с хорошим КПД. Описанный эффект вытеснения тока необходимо учитывать при моделировании асинхронных электроприводов, что является предметом рассмотрения в настоящей статье.

ПАРАМЕТРЫ БЕЛИЧЬЕЙ КЛЕТКИ

Вытеснение тока практически происходит только в той части обмотки, которая расположена в пазах. Поэтому выражения для активного сопротивления ротора r_2' и его индуктивного сопротивления рассеяния $x_{\delta 2}'$ можно представить в виде:

$$r_2' = k_r r'_{2n} + r'_{2л}; \quad (1)$$

$$x'_{\delta 2} = k_x x'_{2н} + x'_{2л}$$

где $r'_{2н}$ и $x'_{2н}$ - сопротивления пазовой части обмотки при равномерном распределении тока по сечению стержня; $r'_{2л}$ и $x'_{2л}$ - сопротивления лобовых частей обмотки; k_r и k_x - коэффициенты, учитывающие изменение сопротивлений под влиянием вытеснения тока.

Задачу о вытеснении тока в стержне глубокого паза впервые рассмотрел Ф. Эмде. Он показал, что:

$$k_r = \xi \frac{\text{sh}2\xi + \sin 2\xi}{\text{ch}2\xi - \cos 2\xi},$$

$$k_x = \frac{3}{2\xi} \frac{\text{sh}2\xi - \sin 2\xi}{\text{ch}2\xi - \cos 2\xi}, \quad (2)$$

где

$$\xi = h/h_{np}, \quad (3)$$

$$h_{np} = \sqrt{\frac{2}{\mu\mu_0\gamma\omega}} \quad (4)$$

представляет собой так называемую эквивалентную глубину проникновения тока при поверхностном эффекте, μ - относительная магнитная проницаемость среды, окружающей стержень ротора; $\mu_0=4\pi \cdot 10^{-7}$ Г/м - магнитная постоянная; γ - удельная проводимость материала стержня ротора; ω - круговая частота тока в стержнях ротора.

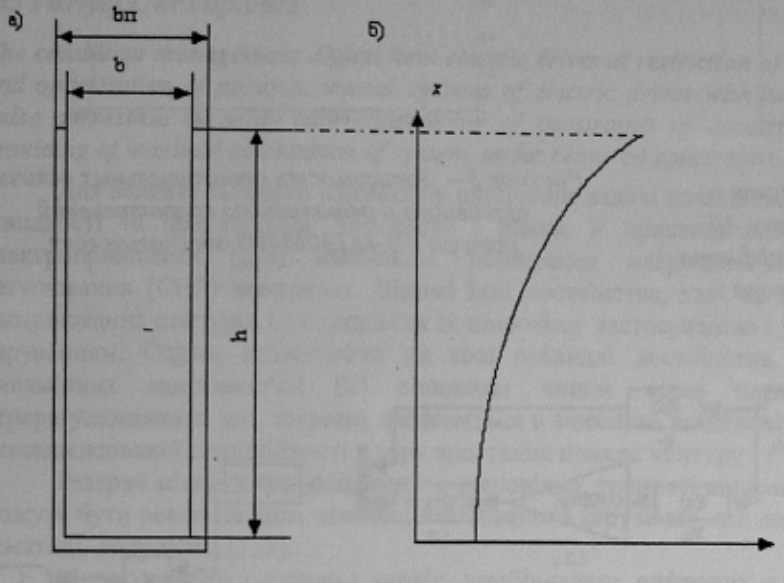


Рисунок 1 – Форма паза ротора глубокопазного двигателя и распределение плотности тока в стержне при пуске

кроме того, положить $f_1=50$ Гц и выразить h в сантиметрах, то для медного стержня получим:

$$\xi = 2\pi \cdot 10^{-3} \frac{h}{100} \sqrt{\frac{50s}{10 \cdot 0.02 \cdot 10^{-6}}} = h \pi \sqrt{\frac{s}{10}} \approx h \sqrt{s} \quad (6)$$

Учитывая, что удельное сопротивление литого алюминиевого стержня примерно в два раза больше, для алюминия получим:

$$\xi \approx \frac{h}{1.41} \sqrt{s} \quad (7)$$

НЕОБХОДИМОСТЬ УЧЕТА ЭФФЕКТА ВЫТЕСНЕНИЯ ТОКА В СТЕРЖНЯХ РОТОРА АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПРИ ЕГО МОДЕЛИРОВАНИИ

Расчет механических характеристик двигателя на основе справочных данных [2], которые не учитывают эффекта вытеснения тока в стержнях ротора АД, показывает (см. рис.2), что полученные результаты хорошо согласуются со справочными данными лишь в области скольжений от нуля до критического. Расчетная величина момента, развиваемого двигателем при пуске, существенно меньше паспортного значения.

На рис.2 приведены зависимости момента, развиваемого АД и действующего значения потребляемого им тока в зависимости от скорости (все величины в относительных к номинальным единицах). Характеристики рассчитаны с помощью математической модели, созданной в среде MATLAB.

Воспользовавшись формулами (1) с учетом (2) и (7), а также справочных данных [2], рассчитаны зависимости параметров роторной цепи двигателя в зависимости от скольжения (рис. 3). Они показывают, что активное сопротивление роторной цепи в момент пуска практически вдвое превышает его справочное значение, приведенное для номинального режима работы. Индуктивность роторной цепи изменяется незначительно.

Для учета эффекта вытеснения тока в стержнях ротора АД при его моделировании на основе рассмотренных выше формул средствами MATLAB составлена модель подсистемы, структурная схема которой приведена на рис.4. Подсистема включена в состав математической модели асинхронного электропривода, питаемого от тиристорного регулятора напряжения. На рис.5 приведены естественные характеристики АД, рассчитанные на модели, содержащей приведенную на рис.4 подсистему. Анализ этих характеристик показывает, что при учете эффекта вытеснения тока в стержнях ротора АД расчетное значение момента, развиваемого им при пуске, совпадает со справочным.

Для приведения выражения к виду, используемому на практике, вводят в равенство (3) вместо удельной проводимости стержня γ его удельное сопротивление ρ , учитывая, что неполное заполнение паза по ширине проводником эквивалентно увеличению ρ в b_π/b раз (см рис. 1).

Подставив (4) в (3), с учетом равенств $\omega=s\omega_1=2\pi s f_1$ и $\mu=1$ (стержень в пазу окружен прослойкой воздуха) получим:

$$\xi = 2\pi \cdot 10^{-3} h \sqrt{\frac{s f_1 b}{10 \rho b_\pi}} \quad (5)$$

Обмотка ротора глубокопазного двигателя обычно не имеет изоляции, поэтому $b=b_\pi$. Для медных стержней при температуре 50°C имеем $\rho=0,02 \cdot 10^{-6}$ Ом/м. Если,

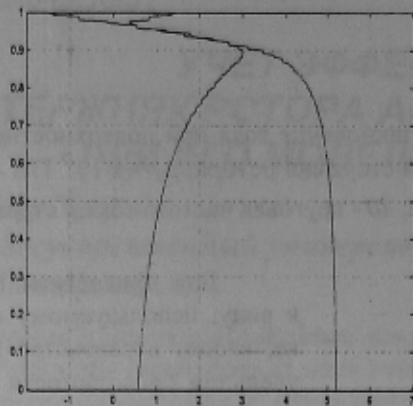


Рисунок 2 – Естественные механическая и электромеханическая характеристики АД 4Ф180М4УЗ, рассчитанные без учёта эффекта вытеснения тока в стержнях ротора

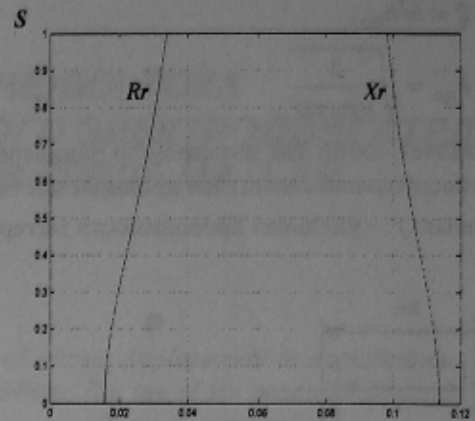


Рисунок 3 – Зависимость относительных величин активного и реактивного сопротивлений ротора АД 4А180М4УЗ от скольжения

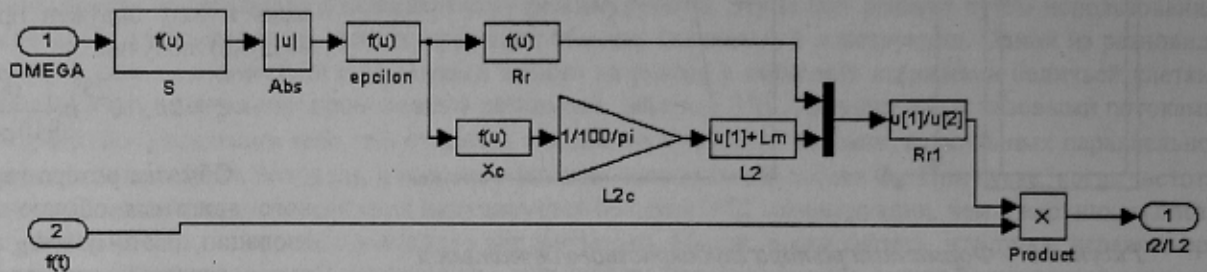


Рисунок 4 - Модель подсистемы для учёта эффекта вытеснения тока в стержнях ротора

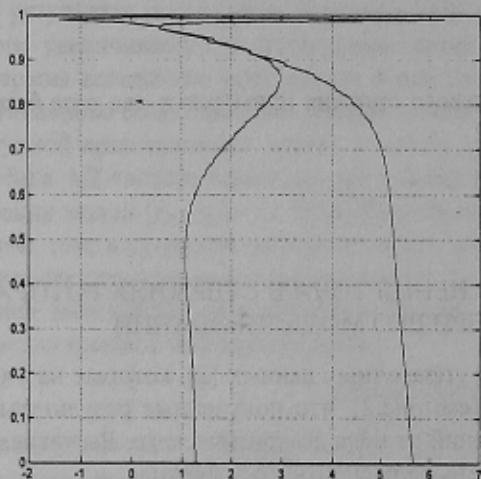


Рис. 5 - Естественные механическая и электромеханическая характеристики АД 4А180М4УЗ, рассчитанные с учётом эффекта вытеснения тока в стержнях ротора

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Отказ от учета в математической модели асинхронного электродвигателя эффекта вытеснения тока в стержнях ротора, как это часто практикуется, допустимо лишь в тех случаях, когда АД работает при небольших величинах скольжения, например при частотном способе управления. Если это условие не выполняется, такое упрощение модели может привести к ощутимым расхождениям между расчетными и экспериментальными данными.

Предложена структура подсистемы учета эффекта вытеснения тока в стержнях ротора АД при исследовании его режимов работы в популярной среде математического моделирования MATLAB.

ЛИТЕРАТУРА

1. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами-Л., Энергоиздат, 1982-392 с.
2. Асинхронные двигатели серии А4: Справочник /А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф, В.И. Афонин, Е.А.Соболенская. – М.: Энергоиздат, 1982. - 504 с.

Надано до редакції:
Рекомендовано до друку:

13.10.2003
д.т.н., проф. Борисенко О.А.