

ВЛИЯНИЕ НАСЫЩЕНИЯ СТАЛИ МАГНИТОПРОВОДА И ВЫТЕСНЕНИЯ ТОКА В ОБМОТКЕ РОТОРА НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ РЕГУЛИРУЕМЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Петрушин В.С., д.т.н., проф., Якимец А.М., к.т.н., доц., Каленик Б.В.
Одесский национальный политехнический университет
Украина, 65044, Одесса, пр-т Шевченко, 1, ОНПУ, кафедра "Электрические машины"
тел. (8-048) 779-74-94, 779-76-80, E-mail: victor_petrushin@ukr.net, yakimets@i.ua

Визначення параметрів заступних схем з урахуванням насичення сталі магнітопроводу і витиснення струму в обмотці ротора забезпечує уточнення розрахунку енергетичних показників регульованих асинхронних двигунів.

Определение параметров схемы замещения с учетом насыщения стали магнитопровода и вытеснения тока в обмотке ротора обеспечивает уточнение расчета энергетических показателей регулируемого асинхронного двигателя.

Разработка асинхронных двигателей нового поколения, адаптированных к специфическим условиям эксплуатации в регулируемых электроприводах, не осуществима без математического описания электромагнитных, электромеханических, энергетических, тепловых и других процессов и формирования на базе этого описания математических моделей (ММ). Как правило, исследование характеристик регулируемых асинхронных двигателей (РАД) проводится без учета насыщения стали магнитопровода и вытеснения тока в обмотке ротора. Параметры схемы замещения РАД в различных рабочих точках диапазона регулирования в значительной степени зависят от параметров питающей двигатель электроэнергией, поступающей от полупроводниковых преобразователей. Значения напряжений и частот определяются типами преобразователей и существенно меняются в каждой точке требуемого диапазона регулирования в зависимости от используемых видов регулирования, законов частотного управления. Для преобразователей напряжения, преобразователей частоты (ПЧ) с автономными инверторами напряжения и для непосредственных преобразователей частоты на входе двигателя при регулировании меняются величины и частоты подводимого напряжения (источник напряжения), для преобразователей частоты с автономными инверторами тока – величины и частоты тока инвертора (источник тока).

Характеристики РАД могут быть определены в результате анализа эквивалентной схемы замещения двигателя с переменными параметрами (рис. 1). В ней все сопротивления (индуктивные x_1, x_2, x_0 и активное

r_0), исключая активные сопротивления обмотки статора r_1 и обмотки ротора r_2' , изменяются пропорционально параметру регулирования частоты $\alpha = f_1/f_{1н}$, представляющему собой отношение текущей f_1 и номинальной $f_{1н}$ частот на выходе преобразователя. Кроме того, как переменные на рис. 1 изображены параметры, значения которых изменяются вследствие таких явлений, как насыщение стали магнитопровода и вытеснение тока обмотки ротора. Приведенное активное сопротивление обмотки ротора r_2' обратно пропорционально абсолютному скольжению, равному отношению текущей частоты тока в обмотке ротора f_2 к номинальной частоте преобразователя $\beta = f_2/f_{1н} = \alpha \cdot s$, где s – скольжение двигателя. Переменные параметры схемы замещения АД рассчитываются с учетом нелинейностей, связанных с насыщением магнитопровода и вытеснением тока в проводниках обмотки ротора. При использовании ПЧ – источников напряжения приложенное к двигателю напряжение оценивается относительной величиной параметра регулирования $\gamma_i = U_i/U_{1н}$ – отношением текущего и номинального напряжений питания двигателя, где i – номер закона. При использовании ПЧ – источников тока одновременно с изменением частоты меняется по определенному закону и величина статорного тока, т.е. параметром регулирования $\gamma_i = I_1/I_{1н}$ является отношение текущего I_1 и номинального $I_{1н}$ значений тока преобразователя. Законы частотного управления при использовании ПЧ – источников напряжения можно разделить на две группы [1, 2]. К первой группе относятся законы, связывающие величины и частоты

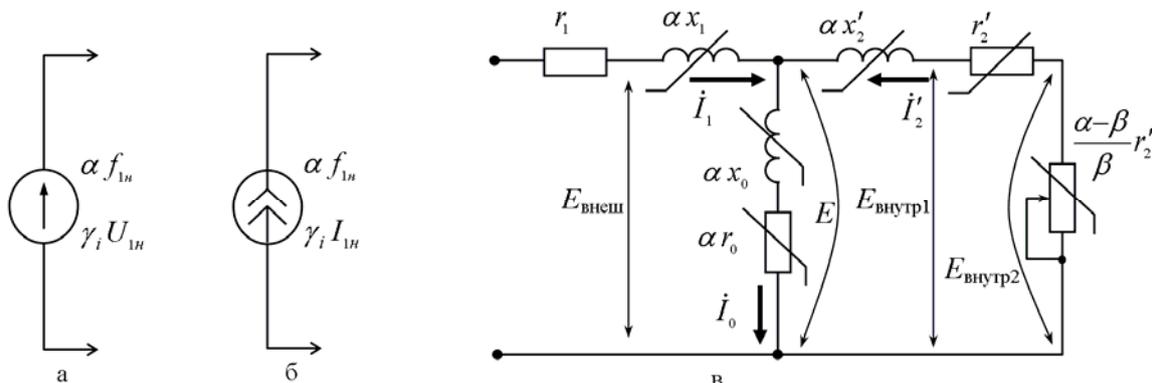


Рис. 1. Источники питания напряжения (а), тока (б) и схема замещения (в)

питающего двигателя напряжения ($U/f = \text{const}$, $U/f^2 = \text{const}$, $U/\sqrt{f} = \text{const}$ и др.). Ко второй – законы, обеспечивающие постоянство различных магнитных потокоцеплений электрической машины: статора Ψ_1 (соответствующее постоянству $E_{\text{внеш}}/f$), воздушного зазора Ψ_0 (постоянству E/f), ротора Ψ_2 (постоянству $E_{\text{внутр1}}/f$). При законе управления $E_{\text{внутр1}}/f = \text{const}$ обеспечивается непосредственное управление моментом электродвигателя. При этом качество управления ЭП в статических и динамических режимах существенно повышается по сравнению с другими законами. Непосредственное управление мощностью на валу двигателя обеспечивается впервые предлагаемым законом [1], при котором поддерживается постоянство отношения $E_{\text{внутр2}}/f = \text{const}$, где $E_{\text{внутр2}} = E_{\text{внутр1}} - I_2' \cdot r_2'$ определяется с учетом падения напряжения на активном сопротивлении ротора.

При разработке общепромышленных двигателей серии 4А применялась методика в которой учёт насыщения магнитопровода осуществлялся за счёт введения дополнительного раскрытия паза статора, а учёт вытеснения тока в обмотке ротора базировался на представлении схемы замещения роторной обмотки в виде многозвенной цепи [3, 4]. Целесообразно эти же методики использовать при анализе работы РАД в определенном диапазоне регулирования с заданной нагрузкой на валу [5]. На кафедре электрических машин Одесского национального политехнического университета разработана программа DIMAS-Drive, с помощью которой рассчитываются характеристики АД с учетом изменений параметров схемы замещения в каждой рабочей точке диапазона регулирования [6].

Были проведены теоретические и экспериментальные исследования энергетических показателей – КПД (η) и коэффициента мощности (χ) асинхронного двигателя 4А71А2У3, который работал на нагрузку с моментом 2 Н·м (79% от $M_{\text{ном}}$) в требуемом диапазоне регулирования 300 – 3450 об/мин. Питание двигателя

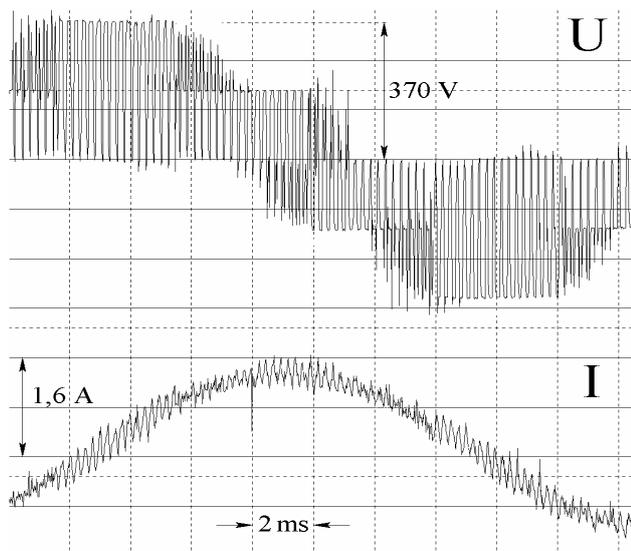


Рис. 2. Осциллограммы фазного напряжения и фазного тока РАД при питании от ПЧ в режиме холостого хода на частоте 40 Гц ($U = 185$ В, $I = 1$ А)

обеспечивалось транзисторным частотным преобразователем Altivar 28 Telemecanique. Входное сетевое линейное напряжение во время эксперимента составляло 400 В. Преобразователь имел следующие настройки: $U_{\text{ном}} = 230$ В и $f_{\text{ном}} = 50$ Гц, частота модуляции 4 кГц. Характеристики были получены для двух законов частотного управления $U/f = \text{const}$ и $\Psi_2 = \text{const}$. С целью определения энергетических показателей проводилось осциллографирование напряжения питания и потребляемого тока РАД и анализ их спектра. Осциллограммы вышеуказанных величин приведены на рис. 2. При определении коэффициента мощности РАД учитывалась полигармоничность выходного напряжения ПЧ [7].

На рис. 3 а, б представлены теоретические зависимости η , а на рис. 4 а, б теоретические зависимости χ от частоты вращения с учетом и без учета вытеснения и насыщения и экспериментальные зависимости этих же величин для двух анализируемых законов частотного управления.

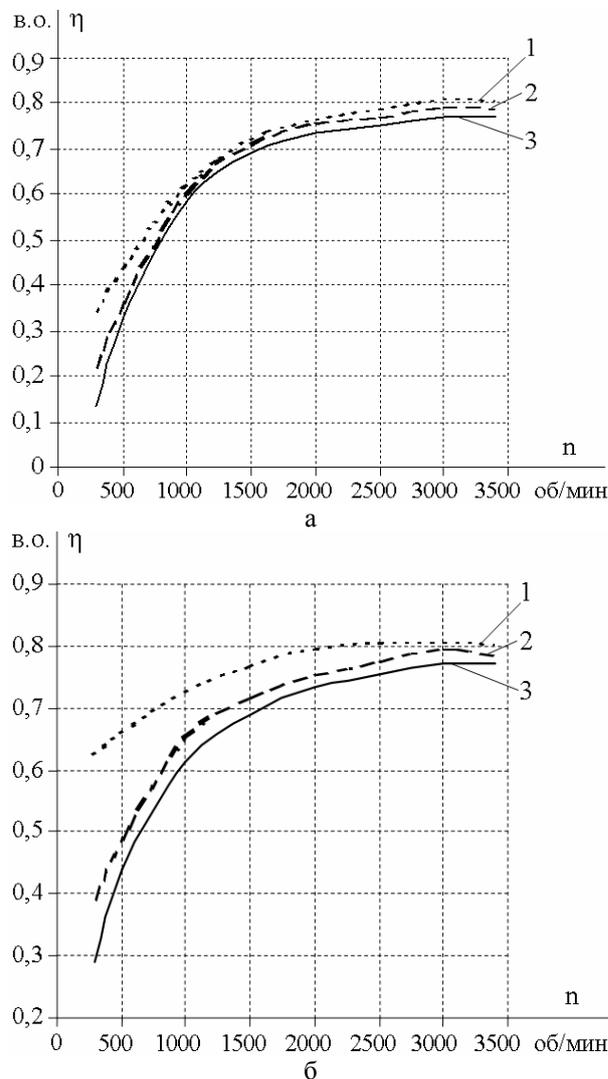


Рис. 3. Зависимость КПД от частоты вращения для законов частотного управления $U/f = \text{const}$ (а) и $\Psi_2 = \text{const}$ (б): 1 – без учета вытеснения и насыщения; 2 – с учетом вытеснения и насыщения; 3 – эксперимент

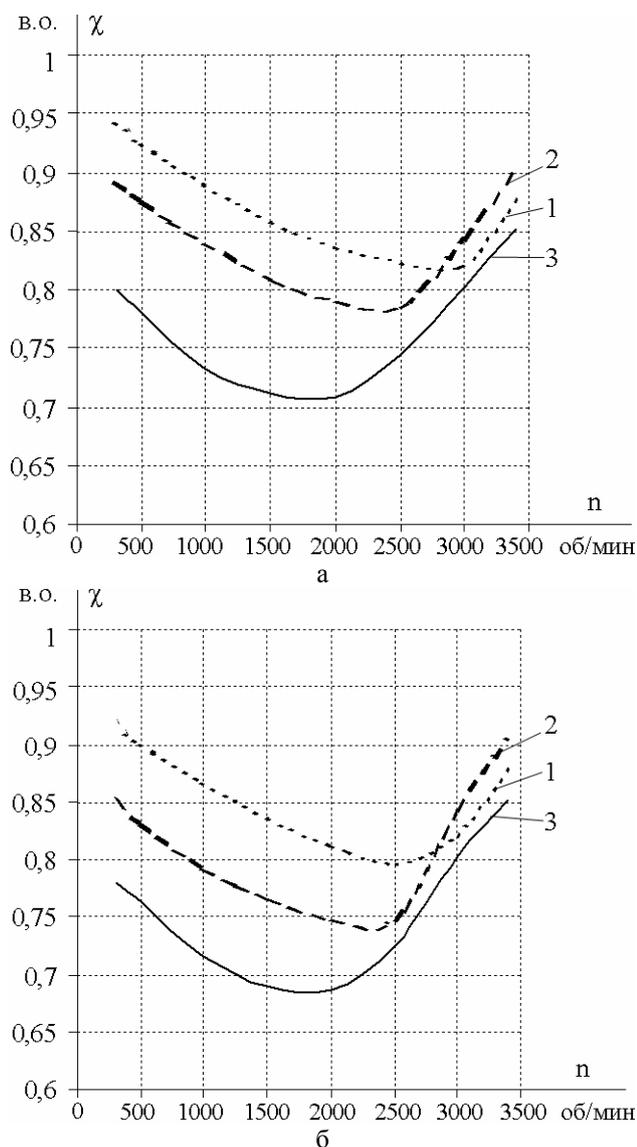


Рис. 4. Зависимость коэффициента мощности от частоты вращения для законов частотного управления $U/f = \text{const}$ (а) и $\Psi_2 = \text{const}$ (б): 1 – без учета вытеснения и насыщения; 2 – с учетом вытеснения и насыщения; 3 – эксперимент

При моделировании без учета вытеснения и насыщения в качестве параметров схемы замещения исследуемого двигателя использовались параметры, приведенные в справочнике [8], и их значения оставались неизменными в диапазоне регулирования.

Полученные зависимости позволяют сделать следующие выводы:

- погрешности вычислений η из-за неучета вытеснения и насыщения составляют при $U/f = \text{const}$ – 0,01 – 0,15, при $\Psi_2 = \text{const}$ – 0,013 – 0,22;

- погрешности вычислений χ из-за неучета вытеснения и насыщения в зоне ниже номинальной частоты составляют при $U/f = \text{const}$ – 0,01 ÷ 0,05, при $\Psi_2 = \text{const}$ – 0,01 ÷ 0,07;

- в зоне выше номинальной частоты методика учета вытеснения и насыщения при расчете χ нуждается в корректировке;

- неучет вытеснения и насыщения при законе $\Psi_2 = \text{const}$ вызывает большую погрешность при расчете

те энергетических показателей, чем при законе $U/f = \text{const}$;

- степень уточнения зависит от мощности, конструкции и исполнения двигателя. Так в двигателях с глубокими пазами в различных точках диапазона регулирования явление вытеснения проявляется существенно;

- аналогичным образом представляется возможным уточнить расчет энергетических показателей РАД в других системах регулируемых электроприводов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Петрушин В.С. Регулировочные характеристики АД в частотном электроприводе при законах управления, обеспечивающих постоянства потокоцеплений // Электротехника і електромеханіка: Науково-практичний журнал. – 2002. – №2. – С. 53 – 55.
- [2] Петрушин В.С., Таньков А.А. Энергетические показатели асинхронного двигателя в частотном электроприводе при различных законах управления // "Електромашинобудування та електрообладнання": Респ. міжвід.наук.-техн. зб., вип. 55, 2000, С. 11 – 15.
- [3] Проектирование электрических машин / Под ред. И.П. Копылова. – М.: Энергия, 1980. – 496 с.
- [4] Клоков Б.К. Расчет вытеснения тока в стержнях произвольной конфигурации // Электротехника. – 1969. – №9. – С. 48 – 51.
- [5] Лысенко С.И., Петрушин В.С., Слободниченко Б.И. Математическая модель асинхронного короткозамкнутого двигателя при частотном регулировании. // Техн. электро-динамика. – 1998. Спецвып. – С.31 – 36.
- [6] Петрушин В.С., Рябинин С.В., Якимец А.М. Программный продукт "DIMASDrive". Программа анализа работы, выбора и проектирования асинхронных короткозамкнутых двигателей систем регулируемого электропривода (свидетельство о регистрации программы ПА№4065). Киев: Министерство образования и науки Украины. Государственный департамент интеллектуальной собственности, 26.03.2001.
- [7] Петрушин В.С. Коэффициент мощности электрических нагрузок в автономных деформированных системах // Изв. ВУЗов "Энергетика", 1990, -№4. – С. 41-43.
- [8] Асинхронные двигатели общего назначения / Е.П. Бойко, Ю.В. Гаинцев, Ю.М. Ковалев и др.; Под ред. В.М. Петрова и А.Э. Кравчика. – М.: Энергия, 1980. – 488 с.

Поступила 30.08.2007