

## ВЛИЯНИЕ НАСЫЩЕНИЯ СТАЛИ МАГНИТОПРОВОДА И ВЫТЕСНЕНИЯ ТОКА В ОБМОТКЕ РОТОРА НА ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕГУЛИРУЕМЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

*У результаті дослідження частотно-регульованого асинхронного двигуна в динамічному режимі встановлено, що у випадку урахування впливу насичення сталі магнітопроводу та витіснення струму в обмотці ротора похибка при визначенні кидків струму для закону управління  $U/f = const$ , знизилась у середньому до 6 % у порівнянні із 13 % без урахування та, відповідно, до 3 % у порівнянні із 17 % при законі управління із незмінним потокозчепленням ротора  $\Psi_2 = const$ .*

*В результате исследования частотно-регулируемого асинхронного двигателя в динамическом режиме установлено, что в случае учета влияния насыщения стали магнитопровода и вытеснения тока в обмотке ротора погрешность при определении бросков тока для закона управления  $U/f = const$  снизилась в среднем до 6 % по сравнению с 13 % без учета и, соответственно, до 3 % по сравнению с 17 % при законе управления с неизменным потокозчеплением ротора  $\Psi_2 = const$ .*

### ВВЕДЕНИЕ

Явления насыщения стали магнитопровода и вытеснения тока в обмотке ротора влияют на значения параметров схемы замещения асинхронного двигателя (АД). Особенно существенно это влияние в АД регулируемых электроприводов, работающих в широких диапазонах изменения частоты вращения. Ряд работ [1-3] посвящен изменению механических, энергетических, тепловых характеристик с учетом вышеуказанных явлений регулируемых асинхронных двигателей (РАД) в статических режимах. Вместе с тем РАД эксплуатируются преимущественно в перемежающихся режимах с последовательной сменой периодов работы с неизменной нагрузкой на одной частоте вращения, периодами работы на другой частоте вращения, с иной, но также неизменной нагрузкой соответствующей этой частоте. В связи с этим целесообразно исследование динамических характеристик РАД, связанных с переходом с одной частоты вращения на другую. При этом может быть использован значительный опыт по исследованию переходных процессов в асинхронных машинах [4].

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Хотя в некоторых статьях предлагается анализировать переходные процессы в РАД с учетом изменения параметров двигателя [5-8], как правило, исследование характеристик РАД проводится без учета насыщения магнитопровода и вытеснения тока. Математические модели (ММ), используемые для исследования переходных электромагнитных процессов в АД, основаны на системах нелинейных дифференциальных уравнений равновесия напряжений и токов в системе преобразованных координат [9]

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \Psi_{s\alpha} &= u_{s\alpha}(t) - r_s d(t) [x_r(t) \Psi_{s\alpha}(t) - x_M(t) \Psi_{r\alpha}(t)], \\ \frac{d}{dt} \Psi_{s\beta} &= u_{s\beta}(t) - r_s d(t) [x_r(t) \Psi_{s\beta}(t) - x_M(t) \Psi_{r\beta}(t)], \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \Psi_{r\alpha} &= -p\omega_r \Psi_{r\beta}(t) - r_r(t) d(t) \times \\ &\times [x_s(t) \Psi_{r\alpha}(t) - x_M(t) \Psi_{s\alpha}(t)], \\ \frac{d}{dt} \Psi_{r\beta} &= p\omega_r \Psi_{r\beta}(t) - r_r(t) d(t) \times \\ &\times [x_s(t) \Psi_{r\beta}(t) - x_M(t) \Psi_{s\beta}(t)], \\ \frac{d\omega_r}{dt} &= \frac{1}{J} \left\{ \frac{3p}{2} d(t) x_M(t) [\Psi_{s\beta}(t) \Psi_{r\alpha}(t) - \right. \\ &\left. - \Psi_{r\beta}(t) \Psi_{s\alpha}(t)] - M_c(\omega_r) \right\}, \end{aligned}$$

где  $\Psi_{s\alpha}(t)$ ,  $\Psi_{s\beta}(t)$ ,  $\Psi_{r\alpha}(t)$ , и  $\Psi_{r\beta}(t)$  – потокозчепления статорных и роторных обмоток машины, соответственно по осям  $\alpha$  и  $\beta$ ;  $\omega_r$  – угловая частота вращения вала;  $p$  – число пар полюсов;  $J$  – суммарный момент инерции привода, приведенный к валу двигателя;  $M_c(\omega_r)$  – зависимость момента сопротивления механизма от частоты вращения;  $r_s$ ,  $r_r(t)$ ,  $x_s(t)$ ,  $x_r(t)$ ,  $x_M(t)$  – активные и полные реактивные сопротивления обмоток статора и ротора и сопротивление взаимной индукции, причем все они, за исключением  $r_s$  изменяются на каждом шаге интегрирования;  $d(t)$  – вспомогательная переменная  $d(t) = [x_s(t) \cdot x_r(t) - (x_M(t))^2]^{-1}$ ;  $u_{s\alpha}(t)$  и  $u_{s\beta}(t)$  – мгновенные значения напряжений по осям  $\alpha$  и  $\beta$ , которые определяются амплитудой напряжения  $U_m$  (зависящей от закона частотного управления) и угловым положением обобщенного вектора напряжения  $\varphi_1$

$$u_{s\alpha}(t) = U_m(t) \cdot \cos(\varphi_1), \quad u_{s\beta}(t) = U_m(t) \cdot \sin(\varphi_1),$$

при этом система дополняется еще двумя дифференциальными уравнениями

$$\frac{d}{dt} \varphi_1 = \omega_1 \quad \text{и} \quad \frac{d}{dt} \omega_1 = \varepsilon_1(t),$$

где  $\omega_1$  – угловая частота вращения, а  $\varepsilon(t)$  – график угловых ускорений обобщенного вектора напряжения, определяемый задаваемой тахограммой движения привода.

Выражения, связывающие мгновенные значения токов и потокозчеплений, имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} i_{s\alpha}(t) &= d(t) \cdot [x_r(t) \cdot \Psi_{s\alpha}(t) - x_M(t) \cdot \Psi_{r\alpha}(t)], \\ i_{s\beta}(t) &= d(t) \cdot [x_r(t) \cdot \Psi_{s\beta}(t) - x_M(t) \cdot \Psi_{r\beta}(t)] \end{aligned}$$

где  $i_{s\alpha}$ ,  $i_{s\beta}$  – токи статора по осям  $\alpha$  и  $\beta$ . Действующее значение тока статора

$$i_1(t) = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot [i_{s\alpha}(t)^2 + i_{s\beta}(t)^2]}.$$

Математическая модель, построенная на базе вышеописанных дифференциальных уравнений, позволяет провести расчеты частот вращения, токов в фазах обмоток, электромагнитных моментов, потерь.

В каждом из уравнений имеют место нелинейные коэффициенты – параметры двигателя, изменяющиеся в каждой рабочей точке, в том числе и вследствие явлений насыщения магнитной системы и вытеснения тока в обмотке ротора. Один из подходов к анализу динамических характеристик АД предполагает предварительное определение этих коэффициентов для необходимых рабочих точек диапазона регулирования. Поэтому до анализа переходного процесса проводятся расчеты установившихся режимов с целью получения значений всех параметров схемы замещения с учетом вытеснения тока в обмотке ротора и насыщения магнитопровода для необходимых рабочих точек диапазона регулирования. Для этого используются ММ установившихся режимов [10]. При расчетах динамических режимов учитываются изменения на каждом шаге интегрирования системы, т.е. в определенных точках характеристики перехода от одной частоты вращения к другой, величин и частот питающего напряжения в соответствии с используемым законом частотного регулирования, параметров схемы замещения. При нагрузках вентиляторного и тягового характера изменяется также момент нагрузки, значение которого, соответствующее угловой частоте вращения привода, определяется по нагрузочной характеристике. При реализации такого подхода обеспечивается повышение уровня адекватности ММ.

На кафедре электрических машин Одесского национального политехнического университета разработана программа DIMASDrive, с помощью которой рассчитываются динамические характеристики РАД с учетом изменений параметров схемы замещения в каждой рабочей точке диапазона регулирования [11].

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Были проведены теоретические и экспериментальные исследования динамических характеристик асинхронного двигателя АИР71А2У3, который после пуска работал на следующую тахограмму: 1с – 1800 об/мин, 1с – 3000 об/мин, 1с – 4000 об/мин, 2с – 1200 об/мин. Момент инерции двигателя с нагрузочным механизмом составлял  $0,0025 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ . Момент нагрузки на валу имел линейную зависимость от числа оборотов, что описывалась следующим уравнением:  $M = 0,2 + 0,625 \cdot 10^{-3} \cdot n$ . Питание двигателя обеспечивалось транзисторным частотным преобразователем серии Altivar 28 фирмы Telemecanique. Входное сетевое линейное напряжение во время эксперимента составляло 380 В. Преобразователь имел следующие настройки:  $U_{ном} = 230 \text{ В}$  и  $f_{ном} = 50 \text{ Гц}$ , частота модуляции 4 кГц. Скорость нарастания частоты при переходных процессах составляла 50 Гц/с. Характеристики были получены для двух законов частотного

управления  $U/f = \text{const}$  и  $\Psi_2 = \text{const}$ . С целью экспериментального определения действующего значения тока проводилось его осциллографирование. На рис. 1 представлены результаты теоретических (при учете и без учета явлений насыщения и вытеснения) и экспериментальных исследований нестационарных режимов при обработке тахограмм в заданном диапазоне регулирования на различные скорости при двух законах частотного регулирования.

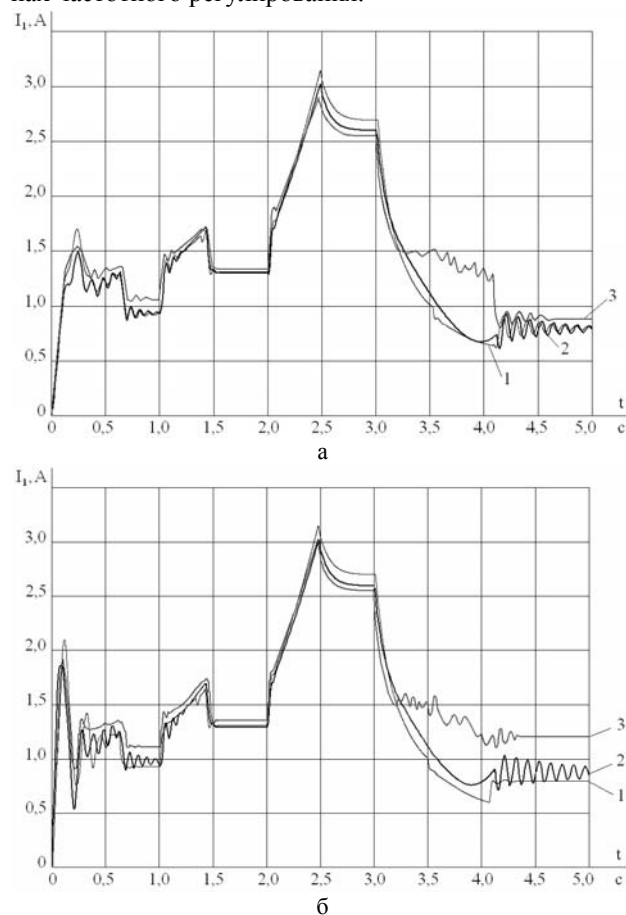


Рис. 1. Изменение тока статора при обработке заданной тахограммы для различных законов управления: а –  $U/f = \text{const}$ ; б –  $\Psi_2 = \text{const}$ ; 1 – без учета насыщения и вытеснения, 2 – с учетом, 3 – данные эксперимента

## ВЫВОДЫ

Полученные зависимости позволяют сделать следующие выводы:

- бросок тока при пуске при законе частотного регулирования  $\Psi_2 = \text{const}$ , больше чем при  $U/f = \text{const}$ , в связи с особенностями регулирования при данном законе;
- при законе частотного регулирования  $\Psi_2 = \text{const}$  двигатель быстрее достигает установившихся значений частот вращения, чем при законе  $U/f = \text{const}$ ;
- установлено, что в случае учета влияния насыщения стали магнитопровода и вытеснения тока в обмотке ротора погрешность при определении бросков тока для закона управления  $U/f = \text{const}$  снизилась в среднем до 6 % по сравнению с 13 % без учета и, соответственно, до 3 % по сравнению с 17 % при законе управления с неизменным потокосцеплением ротора  $\Psi_2 = \text{const}$ ;

- расхождение рассматриваемых погрешностей может значительно отличаться от указанных значений для двигателей больших габаритов и других исполнений, в которых явления насыщения стали магнитопровода и вытеснения тока в обмотке ротора проявляются существенно;
- значительная разница в токах, имеющая место при снижении частоты вращения с 4000 до 1200 об/мин (4-ая секунда) обусловлена переходом преобразователя с режима широтно-импульсной модуляции, на режим со 180-й длительностью проводящего состояния транзисторов инвертора.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петрушин В.С., Якимец А.М., Левин Д.М. Учет пространственно-временных гармоник магнитного поля при анализе механических характеристик регулируемых асинхронных двигателей // *Электромашинобудування та електрообладнання: Міжвід. наук.-техн. зб., вип. 64, 2005, С. 49-53.*
2. Петрушин В.С., Якимец А.М., Каленик Б.В. Влияние насыщения магнитопровода и вытеснения тока в обмотке ротора на энергетические показатели регулируемых асинхронных двигателей // *Наук.-практ. журнал "Електротехніка і Електромеханіка" № 1, 2008, С. 38-40.*
3. Петрушин В.С., Якимец А.М. Универсальная тепловая схема замещения асинхронных двигателей // *Электромашинобуд. та електрообладнан. – Вип. 59.– 2002. – С. 75-79.*
4. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. М.: Высшая школа, 1987. – 248 с.
5. Петрушин В.С., Рябинин С.В., Якимец А.М. Исследование динамических режимов асинхронных двигателей в регулируемых электроприводах. // *Вісник Національного університету "Львівська політехніка", № 403, Львів, 2000, С. 142-145.*
6. Мартынов В.А. Анализ динамических процессов асинхронных двигателей с учетом вытеснения тока в обмотке ротора // *Электричество. – 1999. – № 2. – С. 38-41.*
7. Петрушин В.С., Якимец А.М. Моделирование динамических режимов асинхронных двигателей при частотном регулировании // *Проблемы автоматизированного электропривода. Вестник НТУ "ХПИ". – 2001. – Вып. 10. – С. 156-157.*
8. Чермалых В.М., Чермалых А.В., Майданский И.Я. Исследование динамики и энергетических показателей асинхронного электропривода с векторным управлением методом виртуального моделирования // *Проблемы автоматизированного электропривода. Вестник НТУ "ХПИ". – 2008. – Вып. 16. – С. 41-45.*
9. Петрушин В.С. Учебное пособие "Асинхронные двигатели в регулируемом электроприводе" // *Одесса, Наука и техника, 2006. – 320 с.*
10. Лысенко С.И., Петрушин В.С., Слободниченко Б.И. Математическая модель асинхронного короткозамкнутого двигателя при частотном регулировании. // *Техн. електродинаміка. – 1998. Спецвип. – С.31-36.*
11. 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: МОН Украины. Гос. деп. интелект. собств., 26.03.2001.

Поступила 22.10.2009

*Петрушин Виктор Сергеевич*, д.т.н., проф.,  
*Якимец Андрей Миронович*, к.т.н., доц.,  
*Каленик Олег Виталиевич*  
 Одесский национальный политехнический университет  
 Украина, 65044, Одесса, пр. Шевченко, 1  
 ОНПУ, кафедра "Электрические машины"  
 тел. (048) 734-84-94, 734-84-79  
 e-mail: victor\_petrushin@ukr.net, yakimets@i.ua  
*Бендахман Бухалфа*, к.т.н., проф.,  
 l'Université de Béjaïa (Алжир),

*V.S. Petrushin, Bendahmane Boukhalfa, A.M. Yakimets, O.V. Kalenik*

#### **Influence of magnetic core steel saturation and rotor current displacement on dynamic characteristics of adjustable-speed induction motors.**

Results of research on adjustable-speed induction motors in dynamic conditions have revealed that, in case of taking into account influence of magnetic core's saturation and rotor current's displacement, the error of stator's current jump determination decreases to 6 % in comparison with 13 % without allowing for control law of  $U / f = \text{const}$ , and, accordingly, the error decreases to 3 % in comparison with 17 % for frequency control law of  $\Psi_2 = \text{const}$ .

**Key words** – induction motor, frequency control, magnetic core's saturation, rotor current's displacement, dynamic mode.