

## УЧЕТ ВЫСШИХ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ГАРМОНИК В ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ ПРИ АНАЛИЗЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

*Запропонована математична модель асинхронного двигуна, яка дозволяє здійснити урахування вищих просторово-часових гармонік. В результаті виконаних досліджень встановлено, що урахування цих гармонік дає можливість уточнити токові залежності. Між тим, урахування не виявляє суттєвий вплив на швидкісну характеристику частотно-регульованого асинхронного двигуна.*

*Предложена математическая модель регулируемого асинхронного двигателя, позволяющая осуществить учет высших пространственно-временных гармоник. В результате проведенных исследований установлено, что учет этих гармоник дает возможность уточнить токовые зависимости. Между тем, учет не оказывает существенное влияние на скоростную характеристику частотно-регулируемого асинхронного двигателя.*

### ВВЕДЕНИЕ

Асинхронные двигатели (АД) в составе регулируемых электроприводов работают преимущественно в неустановившихся режимах, связанных с пуском, торможением, реверсом, переходом с одной скорости на другую, набросом нагрузки и т.д. Особенно часто АД в системах регулируемого частотного электропривода эксплуатируются 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. При анализе работы АД в таких режимах может быть использован значительный опыт по исследованию переходных процессов в асинхронных машинах [1].

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью статьи является сопоставление моделирования переходных процессов в РАД при учете и без учета ВПВГ. В ряде случаев выходное напряжение полупроводниковых преобразователей, питающих регулируемые асинхронные двигатели (РАД), характеризуется наличием высших временных гармонических (ВВГ). Каждая ВВГ создает ряд высших пространственных гармонических (ВПГ). Существует ряд статей, в которых рассматривается учет ВВГ при анализе установившихся режимов РАД [2-4]. При учете совокупного влияния высших пространственно-временных гармоник (ВПВГ) обеспечивается корректировка механических характеристик РАД [5], уточнение энергетических и тепловых показателей в установившихся режимах работы [6].

В некоторых статьях выполнен анализ переходных процессов РАД как с учетом изменения параметров двигателя [7, 8], так и с учетом ВВГ [9]. Учет совокупного влияния ВПВГ на характеристики РАД в переходных режимах возможно осуществить используя подход, изложенный в [1, 10]. Согласно нему РАД в системе преобразованных координат может быть описан системой уравнений, составленных для каждого условного двигателя, питаемого напряжением соответствующей ВПВГ, совокупностью которых заменяется реальный двигатель, т.е. для каждой учитываемой ВПВГ. Например, если принимаются во

внимание пространственные и временные гармоники порядков 1, 5, 7, 11, 13, то уравнений в системе будет 125. В матричном виде система уравнений представляется так:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \Psi_{s\alpha v}(t) &= \mathbf{u}_{s\alpha v}(t) - \mathbf{r}_{sv} \cdot \mathbf{d}_v(t) \times \\ &\times \left[ \mathbf{x}_{rv}(t) \cdot \Psi_{s\alpha v}(t) - \mathbf{x}_{Mv}(t) \cdot \Psi_{r\alpha v}(t) \right], \\ \frac{d}{dt} \Psi_{s\beta v}(t) &= \mathbf{u}_{s\beta v}(t) - \mathbf{r}_{sv} \cdot \mathbf{d}_v(t) \times \\ &\times \left[ \mathbf{x}_{rv}(t) \cdot \Psi_{s\beta v}(t) - \mathbf{x}_{Mv}(t) \cdot \Psi_{r\beta v}(t) \right], \\ \frac{d}{dt} \Psi_{r\alpha v}(t) &= -p \cdot \omega_r \cdot \Psi_{r\beta v}(t) - \mathbf{r}_{rv}(t) \cdot \mathbf{d}_v(t) \times \\ &\times \left[ \mathbf{x}_{sv}(t) \cdot \Psi_{r\alpha v}(t) - \mathbf{x}_{Mv}(t) \cdot \Psi_{s\alpha v}(t) \right], \\ \frac{d}{dt} \Psi_{r\beta v}(t) &= p \cdot \omega_r \cdot \Psi_{r\alpha v}(t) - \mathbf{r}_{rv}(t) \cdot \mathbf{d}_v(t) \times \\ &\times \left[ \mathbf{x}_{sv}(t) \cdot \Psi_{r\beta v}(t) - \mathbf{x}_{Mv}(t) \cdot \Psi_{s\beta v}(t) \right], \\ \frac{d\omega_r}{dt} &= \frac{1}{J} \cdot \left\{ \frac{3p}{2} \cdot \left[ \mathbf{x}_{Mv}(t) \cdot \mathbf{d}_v(t) \times \right. \right. \\ &\times \Psi_{s\beta v}(t) \cdot \Psi_{r\alpha v}(t) - \mathbf{x}_{Mv}(t) \cdot \mathbf{d}_v(t) \times \\ &\left. \left. \times \Psi_{s\alpha v}(t) \cdot \Psi_{r\beta v}(t) \right] - M_c(\omega_r, t) \right\}, \end{aligned}$$

где включаемые матрицы являются двумерными;  $\Psi_{s\alpha v}(t)$ ,  $\Psi_{s\beta v}(t)$ ,  $\Psi_{r\alpha v}(t)$  и  $\Psi_{r\beta v}(t)$  – матрицы потокосцеплений 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;  $M_c(\omega_r, t)$  – зависимость момента сопротивления механизма от частоты вращения;  $\mathbf{r}_{sv}$ ,  $\mathbf{r}_{rv}(t)$ ,  $\mathbf{x}_{sv}(t)$ ,  $\mathbf{x}_{rv}(t)$ ,  $\mathbf{x}_{Mv}(t)$  – матрицы активных и реактивных сопротивлений обмоток статора и ротора и сопротивлений взаимной индукции, причем все они, за исключением  $\mathbf{r}_{sv}$ , изменяются на каждом шаге интегрирования;  $\mathbf{d}_v(t)$  – матрицы вспомогательных переменных  $\mathbf{d}_v(t) = [\mathbf{x}_{sv}(t) \cdot \mathbf{x}_{rv}(t) - (\mathbf{x}_{Mv}(t))^2]^{-1}$ ;

$\mathbf{u}_{s\alpha v}(t)$  и  $\mathbf{u}_{s\beta v}(t)$  – матрицы мгновенных значений напряжений по осям  $\alpha$  и  $\beta$ , которые определяются амплитудами напряжений  $\mathbf{U}_{mv}$  (зависящих от закона частотного управления) и угловых положений обобщенных векторов напряжений  $\varphi_{1v}$ :

$$\mathbf{u}_{s\alpha v}(t) = \mathbf{U}_{mv}(t) \cdot \cos(\varphi_{1v});$$

$$\mathbf{u}_{s\beta v}(t) = \mathbf{U}_{mv}(t) \cdot \sin(\varphi_{1v}),$$

при этом система дополняется еще двумя дифференциальными уравнениями:

$$\frac{d}{dt} \varphi_{1v} = \boldsymbol{\omega}_{1v} \quad \text{и} \quad \frac{d}{dt} \boldsymbol{\omega}_{1v} = \boldsymbol{\varepsilon}_{1v}(t),$$

где  $\boldsymbol{\omega}_{1v}$  – матрицы угловых частот вращения, а  $\boldsymbol{\varepsilon}_{1v}(t)$  – матрицы угловых ускорений обобщенных векторов напряжений, определяемых задаваемой тахограммой движения привода.

Выражения, связывающие матрицы мгновенных значений токов и потокосцеплений, имеют следующий вид:

$$\mathbf{i}_{s\alpha v}(t) = \mathbf{d}_v(t) \cdot [\mathbf{x}_{rv}(t) \cdot \boldsymbol{\Psi}_{s\alpha v}(t) - \mathbf{x}_{Mv}(t) \cdot \boldsymbol{\Psi}_{r\alpha v}(t)],$$

$$\mathbf{i}_{s\beta v}(t) = \mathbf{d}_v(t) \cdot [\mathbf{x}_{rv}(t) \cdot \boldsymbol{\Psi}_{s\beta v}(t) - \mathbf{x}_{Mv}(t) \cdot \boldsymbol{\Psi}_{r\beta v}(t)],$$

где  $\mathbf{i}_{s\alpha v}$ ,  $\mathbf{i}_{s\beta v}$  – матрицы токов статора по осям  $\alpha$  и  $\beta$ .

Действующее значение тока статора

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

В каждом из уравнений имеют место нелинейные коэффициенты – параметры условных двигателей основной гармоники и ВПВГ, изменяющиеся в каждой рабочей точке, в том числе и вследствие явлений насыщения магнитной системы и вытеснения тока в обмотке ротора. Предлагаемый подход 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 схем замещения основной гармоники и ВПВГ с учетом вытеснения токов в обмотке ротора и насыщения магнитопровода для необходимых рабочих точек диапазона регулирования. Для этого используются ММ установившихся режимов [11]. 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 схем замещения основной гармоники и ВПВГ. 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.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве объекта исследований был выбран асинхронный короткозамкнутый двигатель 4АХ80А6У3. Теоретические и экспериментальные исследования были проведены при работе этого дви-

гателя в составе частотного привода на следующую тахограмму: 2с – 200 об/мин, 2с – 500 об/мин, 3с – 1000 об/мин, 2с – 750 об/мин.

Момент инерции двигателя с нагрузочным механизмом составлял 0,01 кг·м<sup>2</sup>. Момент нагрузки на валу имел линейную зависимость от числа оборотов, что описывалась следующим уравнением:  $M = 0,3 + n$ .

Рассматриваемые математические модели легли в основу расчетной программы, с помощью которой были выполнены теоретические исследования нестационарных режимов двигателя, работающего в частотном электроприводе при законе управления  $U/f = \text{const}$ . На рис. 1 представлены результаты теоретических (при учете и не учета ВПВГ) и экспериментальных исследований нестационарных режимов при переходе в заданном диапазоне регулирования на различные скорости.

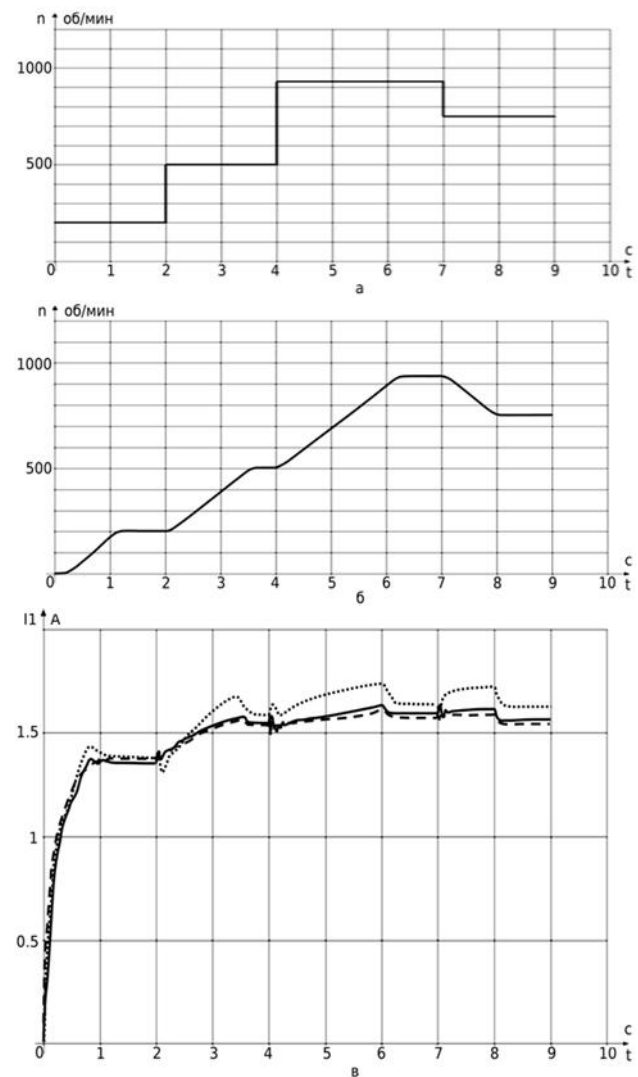


Рис. 1. Зависимости при переходных режимах: а – заданная тахограмма; б – изменение частоты вращения; в – изменение тока статора (---- эксперимент; - - - - моделирование без учета ВПВГ; - · - · - моделирование с учетом ВПВГ)

Двигатель питался от частотного преобразователя ТПТР-10-400-200/50-АУЛЧ с амплитудным видом регулирования. Напряжение на выходе преобразователя содержит ВВГ, действующие значения которых обратно пропорциональны номеру гармоники. Дейст-

вующие значения тока определялись с помощью цифрового осциллографа. Нагрузка на валу короткозамкнутого двигателя 4АХ80АВУЗ менялась с помощью электромагнитного тормоза. Для измерения частоты вращения АД, на его валу установлен синхронный тахогенератор, подключенный через схему выпрямления к измерительному. Параметром преобразователей, используемым при системном анализе неустановившихся режимов, является интенсивность изменения параметра регулирования – частоты питания двигателя, которая составляла 10 Гц/с.

Таким образом, как при теоретических, так и при экспериментальных исследованиях были учтены основные особенности работы асинхронного двигателя, управляемого тиристорным преобразователем ТПТР-10-400-200/50-АУЛЧ с амплитудным видом регулирования и законом частотного управления  $U/f = \text{const}$ , вызванные питанием его напряжением с переменными параметрами (величиной и частотой), несинусоидальностью этого напряжения.

### ВЫВОДЫ

Полученные зависимости позволяют сделать следующие выводы:

1. Учет ВПВГ не оказывает существенное влияние на скоростную характеристику частотно-регулируемого асинхронного двигателя;
2. Снижается погрешность токовых зависимостей при учете ВПВГ (если моделируется переходный процесс без учета ВПВГ погрешность в среднем составляет 5%, с учетом 2%);
3. Используемая при исследовании интенсивность изменения частоты питания двигателя 10 Гц/с дала возможность осуществлять переходы с одной частоты вращения на другую, в том числе и при пуске, без бросков тока и частоты вращения;
4. Экспериментальные зависимости частоты вращения практически совпадают с теоретическими зависимостями.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. М.: Высшая школа, 1987. – 248 с.
2. Маляр В. Математичне моделювання електромагнітних процесів в АД при несинусоїдальному живленні // Проблеми автоматизованого привода. Теорія і практика: Вестник ХГПУ. Спеціальний випуск. – Харків, ХГПУ. – 1998. – С. 311-312.
3. Волков А.В. Анализ и расчет стационарных режимов асинхронных двигателей при питании от АИН // Техн. электродинамика. – 1998. – № 5. – С. 41-46.

4. Глухивский Л.И., Биляковский И.Е. Расчет установившегося режима АД при его несинусоидальном питании // Техн. электродинамика. – 1988. – № 5. – С. 57-60.
5. Петрушин В.С., Якимец А.М., Левин Д.М. Учет пространственно-временных гармоник магнитного поля при анализе механических характеристик регулируемых асинхронных двигателей // Електромашинобудування та електрообладнання: Міжвід. наук.-техн. зб., вип. 64. – 2005. – С. 49-53.
6. Петрушин В.С., Якимец А.М., Груша А.В., Каленик О.В. Энергетические и тепловые показатели регулируемых асинхронных двигателей с учетом высших пространственно-временных гармоник // Електромашинобудування та електрообладнання: Міжвід. наук.-техн. зб., вип. 70. – 2008. – С. 68-71.
7. Петрушин В.С., Рябинин С.В., Якимец А.М. Исследование динамических режимов асинхронных двигателей в регулируемых электроприводах. // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". – № 403. – 2000. – С. 142-145.
8. Мартынов В.А. Анализ динамических процессов асинхронных двигателей с учетом вытеснения тока в обмотке ротора // Электричество. – 1999. – № 2. – С. 38-41.
9. Петрушин В.С., Якимец А.М. Моделирование динамических режимов асинхронных двигателей при частотном регулировании // Проблемы автоматизированного привода. Вестник НТУ "ХПИ". – 2001. – № 10. – С. 156-157.
10. Петрушин В.С. Асинхронные двигатели в регулируемом электроприводе. Одесса: Наука и техника, 2006. – 320 с.
11. Лысенко С.И., Петрушин В.С., Слободниченко Б.И. Математическая модель асинхронного короткозамкнутого двигателя при частотном регулировании // Техн. электродинамика. – 1998 (Спецвыпуск). – С. 31-36.

Поступила 28.10.2010

*Петрушин Виктор Сергеевич, д.т.н., проф.,*

*Каленик Олег Витальевич*

Одесский национальный политехнический университет

кафедра "Электрические машины"

65044, Одесса, пр. Шевченко, 1

тел. (048) 734-84-94, 734-84-79.

e-mail: victor\_petrushin@ukr.net, bayern22@ukr.net

*V.S. Petrushin, O.V. Kalenyk*

### **Account of the spatiotemporal harmonics in the adjustable induction motor at analysis of transients**

A mathematical model, which allows to consider the influence of the spatiotemporal harmonics in the adjustable induction motor is offered. As the result of the researches made, we had the ability to define current dependencies more exactly.

**Key words – induction motor, frequency control, spatiotemporal harmonics, dynamic mode, frequency change intensity.**