

АНАЛИЗ ПУСКА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОМОЩЬЮ ТИРИСТОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ

Експериментально підтверджено коректність математичної моделі неусталених режимів роботи асинхронного двигуна при фазовому управлінні. Досліджено як електричні та механічні параметри, так і енергетичні показники.

Экспериментально подтверждена корректность математической модели неустановившихся режимов работы асинхронного двигателя при фазовом управлении. Исследованы как электрические и механические параметры, так и энергетические показатели.

ВВЕДЕНИЕ

Параметрическое фазовое управление асинхронным двигателем (АД), реализуемое в системе регулируемого асинхронного электропривода "тиристорный преобразователь напряжения (ТПН) – АД", позволяет осуществлять управляемые пускотормозные и реверсивные режимы, а также регулирование скорости некоторых нагрузочных механизмов, в частности турбомеханизмов, в зависимости от требований технологии и энергосбережения [1, 2]. Электропривода с таким управлением имеют низкую стоимость и высокую надежность. Математические модели (ММ), описывающие динамические режимы, должны учитывать специфику работы двигателя в приводах с параметрическим фазовым управлением, заключающуюся в несинусоидальности питающего напряжения переменной величины и изменениях параметров схем замещения, связанных с насыщением магнитной цепи и вытеснением тока в обмотке ротора. При анализе работы АД в динамических режимах может быть использован значительный опыт по исследованию переходных процессов в асинхронных машинах [3].

Каждая высшая временная гармоническая (ВВГ), питающего двигатель напряжения, создает ряд высших пространственных гармонических (ВПГ). В некоторых работах рассматривается учет ВВГ при анализе установившихся и динамических режимов регулируемых асинхронных двигателей (РАД) [4,5,6]. При учете совокупного влияния высших пространственно-временных гармоник (ВПВГ) обеспечивается корректировка механических характеристик РАД [7], уточнение энергетических и тепловых показателей в установившихся режимах работы [8].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ.

Учет совокупного влияния ВПВГ на характеристики РАД в переходных режимах возможно осуществить используя подход, изложенный в [3, 9]. Согласно ему РАД в системе преобразованных координат может быть описан системой дифференциальных уравнений, составленных для каждого условного двигателя, питаемого напряжением соответствующей ВПВГ, совокупностью которых заменяется реальный двигатель, т.е. для каждой учитываемой ВПВГ. В матричном виде уравнения представляются так:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \Psi_{s\alpha v}(t) &= u_{s\alpha v}(t) - r_{sv} \times d_v(t) \times \\ &\times [x_{rv}(t) \times \Psi_{s\alpha v}(t) - x_{Mv}(t) \times \Psi_{r\alpha v}(t)]; \\ \frac{d}{dt} \Psi_{s\beta v}(t) &= u_{s\beta v}(t) - r_{sv} \times d_v(t) \times \\ &\times [x_{rv}(t) \times \Psi_{s\beta v}(t) - x_{Mv}(t) \times \Psi_{r\beta v}(t)]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \Psi_{r\alpha v}(t) &= -p \cdot \omega_p \times \Psi_{r\beta v}(t) - r_{rv}(t) \times d_v(t) \times \\ &\times [x_{sv}(t) \times \Psi_{r\alpha v}(t) - x_{Mv}(t) \times \Psi_{s\alpha v}(t)]; \\ \frac{d}{dt} \Psi_{r\beta v}(t) &= p \cdot \omega_p \times \Psi_{r\alpha v}(t) - r_{rv}(t) \times d_v(t) \times \\ &\times [x_{sv}(t) \times \Psi_{r\beta v}(t) - x_{Mv}(t) \times \Psi_{s\beta v}(t)]; \\ \frac{d}{dt} \omega_p &= \frac{1}{J} \left\{ \frac{3p}{2} \left[\begin{array}{l} x_{Mv}(t) \times d_v(t) \times \Psi_{s\beta v}(t) \times \Psi_{r\alpha v}(t) - \\ - x_{Mv}(t) \times d_v(t) \times \Psi_{s\alpha v}(t) \times \Psi_{r\beta v}(t) \end{array} \right] - \right. \\ &\left. - M_c(\omega_p) \right\}, \end{aligned}$$

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 α и β ; ω_r – угловая частота вращения вала; p – число пар полюсов; J – суммарный момент инерции привода, приведенный к валу двигателя; $M_c(\omega_p)$ – зависимость момента сопротивления механизма от частоты вращения ω_p ; r_{sv} , $r_{rv}(t)$, $x_{sv}(t)$, $x_{rv}(t)$, $x_{Mv}(t)$ – матрицы активных и реактивных сопротивлений обмоток статора и ротора и сопротивлений взаимной индукции, причем все они, за исключением r_{sv} изменяются на каждом шаге интегрирования; $d_v(t)$ – матрицы вспомогательных переменных $d_v(t) = [x_{sv}(t) \cdot x_{rv}(t) - (x_{Mv}(t))^2]^{-1}$; $u_{s\alpha v}(t)$ и $u_{s\beta v}(t)$ – матрицы мгновенных значений напряжений по осям α и β , которые определяются амплитудами напряжений U_{mv} и угловых положений обобщенных векторов напряжений ϕ_{1v} :

$$\begin{aligned} u_{s\alpha v}(t) &= U_{mv}(t) \cdot \cos(\phi_{1v}), \\ u_{s\beta v}(t) &= U_{mv}(t) \cdot \sin(\phi_{1v}), \end{aligned}$$

при этом система дополняется еще одним дифференциальным уравнением:

$$\frac{d}{dt} \phi_{1v} = \omega_{1v},$$

где ω_{1v} – матрица, содержащая угловые частоты вращения соответствующих гармоник.

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

$$\begin{aligned} i_{s\alpha v}(t) &= d_v(t) \cdot [x_{rv}(t) \cdot \Psi_{s\alpha v}(t) - x_{Mv}(t) \cdot \Psi_{r\alpha v}(t)], \\ i_{s\beta v}(t) &= d_v(t) \cdot [x_{rv}(t) \cdot \Psi_{s\beta v}(t) - x_{Mv}(t) \cdot \Psi_{r\beta v}(t)], \end{aligned}$$

где $i_{s\alpha v}$, $i_{s\beta v}$ – матрицы токов статора по осям α и β .

Действующее значение тока статора

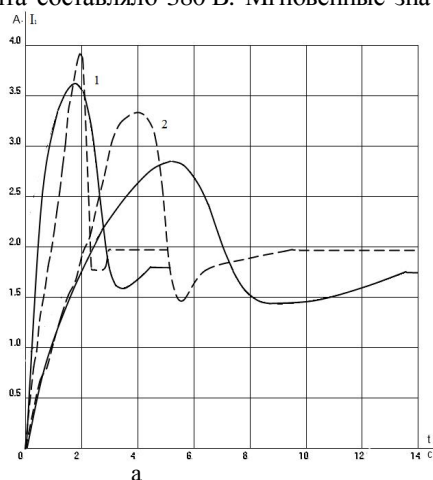
$$i_{1v}(t) = \sqrt{\frac{i_{s\alpha v}(t)^2 + i_{s\beta v}(t)^2}{2}}.$$

В каждом из уравнений имеют место нелинейные коэффициенты – параметры условных двигателей основной гармоники и ВПВГ, изменяющиеся в каждой рабочей точке 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.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Были проведены теоретические и экспериментальные исследования пуска АД с определенной интенсивностью изменения параметра регулирования (угла открытия тиристорov ГПН α , или, соответственно, напряжения на двигателе). Двигатель 4АХ80А6УЗ питался от тиристорного преобразователя напряжения типа "Климатика". Входное сетевое напряжение во время эксперимента составляло 380 В. Мгновенные значения



тока и напряжений фиксировались с помощью цифрового многоканального осциллографа. Момент инерции двигателя с нагрузочным механизмом составлял $0,1 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$. Момент нагрузки на валу имел линейную зависимость от числа оборотов, что описывалась следующим уравнением: $M(n) = 0,3 + 0,0003 \cdot n$. Исследования были проведены при интенсивностях нарастания угла открытия тиристорov 15 град/с и 33 град/с, что примерно соответствует интенсивностям нарастания напряжения на двигателе 20 В/с и 50 В/с.

Рассматриваемые математические модели легли в основу расчетной программы [10], с помощью которой были выполнены теоретические исследования нестационарных режимов двигателя, работающего при фазовом управлении. При данном исследовании принимались во внимание пространственные и временные гармоники порядков 1, 5, 7, 11, 13. На рис. 1 представлены результаты теоретических (сплошной линией) и экспериментальных (пунктиром) исследований – тока, потребляемого двигателем, и расчетного электромагнитного момента при пуске двигателя.

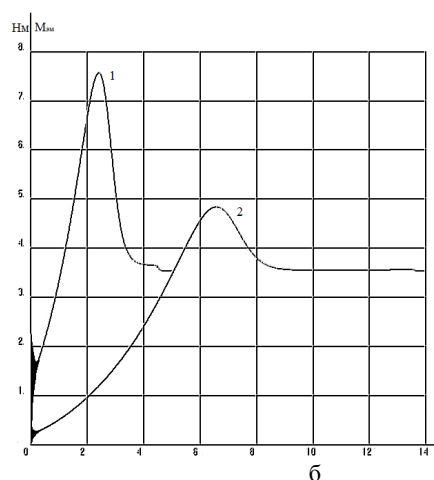


Рис. 1. Ток, потребляемый двигателем (а) и расчетный электромагнитный момент (б) двигателя при пуске. Интенсивность нарастания угла открытия тиристорov: 1 – 15 град/с; 2 – 33 град/с

Потребляемая двигателем условная активная мощность в динамических режимах рассчитывается через матрицы напряжений и токов, учитывающие u гармонических составляющих

$$P_1' = \frac{3}{2} \cdot [U_{s\alpha v} \cdot I_{s\alpha v} + U_{s\beta v} \cdot I_{s\beta v}]$$

Реальная потребляемая активная мощность P_1 больше условной на величину суммы неучтенных потерь (в стали магнитопровода, добавочных, механических)

$$P_1 = P_1' + \Delta P_{ст осн} + \Delta P_{ст дооб} + \Delta P_{мех} + \Delta P_{дооб}$$

Мощность на валу двигателя может быть определена через матрицы потокосцеплений и токов с использованием значения частоты вращения ротора

$$P_2 = \omega_p \cdot \frac{3p}{2} \cdot [I_{s\beta v} \cdot \Psi_{s\alpha v} - I_{s\alpha v} \cdot \Psi_{s\beta v}] - \Delta P_{мех} - \Delta P_{дооб}$$

Мгновенное значение КПД определяется отношением мгновенных значений полезной мощности на валу двигателя P_2 к потребляемой активной мощности P_1 .

Электрические потери в обмотках АД в динамических режимах

$$\Delta P_{эл\Sigma} = \Delta P_{эл1} + \Delta P_{эл2} = \frac{3}{2} \cdot \left((r_{sv} \cdot I_{s\alpha v}) \cdot I_{s\alpha v} + (r_{sv} \cdot I_{s\beta v}) \cdot I_{s\beta v} + (r_{rv}(t) \cdot I_{r\alpha v}) \cdot I_{r\alpha v} + (r_{rv}(t) \cdot I_{r\beta v}) \cdot I_{r\beta v} \right)$$

Потребляемая двигателем условная полная мощность в динамических режимах также определяется через матрицы напряжений и токов

$$S_1' = \frac{3}{2} \cdot \sqrt{[U_{s\alpha v} \cdot U_{s\alpha v} + U_{s\beta v} \cdot U_{s\beta v}] \times [I_{s\alpha v} \cdot I_{s\alpha v} + I_{s\beta v} \cdot I_{s\beta v}]}$$

Полная мощность при несинусоидальном питании состоит из активной, реактивной мощностей, мощности искажения. Сумма квадратов потребляемых двигателем реактивной мощности Q_1 и мощности искажения T_1

$$Q_1^2 + T_1^2 = S_1'^2 - P_1'^2$$

Реальная потребляемая двигателем полная мощность с учетом всех потерь

$$S_1 = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2 + T_1^2} = \sqrt{P_1^2 + S_1'^2 - P_1'^2}$$

Величина мгновенного значения коэффициента мощности χ определяется как отношение мгновенных значений потребляемой активной мощности P_1 к реально потребляемой двигателем полной мощности S_1 .

На рис. 2 представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований энергетических показателей пуска двигателя.

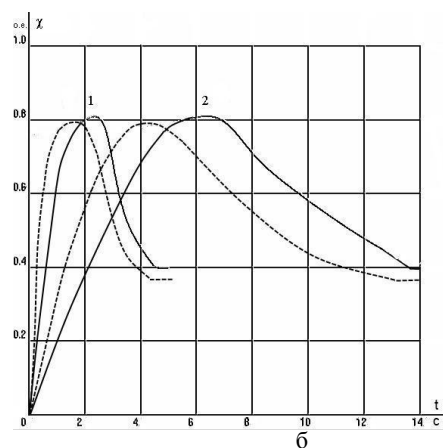
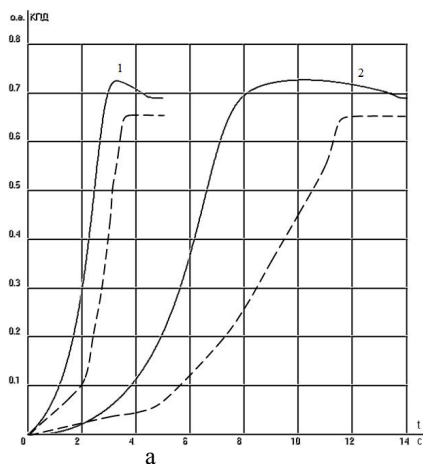


Рис. 2. Энергетические показатели двигателя при пуске: КПД (а) и коэффициент мощности (б). Интенсивность нарастания угла открытия тиристоров: 1 – 15 град/с; 2 – 33 град/с

ВЫВОДЫ

Полученные зависимости позволяют сделать следующие выводы:

- Теоретически и экспериментально подтверждено, что с уменьшением интенсивности изменения параметра регулирования броски тока, потребляемого двигателем, существенно снижаются, а продолжительность пуска увеличивается.

- Броски энергетических показателей не зависят от интенсивности изменения параметра регулирования. Характер экспериментальных и расчетных характеристик идентичен.

- По окончании пуска исследуемые показатели устанавливаются на значениях, соответствующих значениям установившихся режимов.

Аналогичным образом исследуемые показатели могут быть рассчитаны при других условиях пуска (различные нагрузки на валу, моменты инерции, интенсивности нарастания, параметра регулирования и др.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Браславский И.Я. Асинхронный полупроводниковый электропривод с параметрическим управлением. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 224 с.
2. Петров Л.П., Андриященко О.А., Капинос В.И. и др. Тиристорные преобразователи напряжения для асинхронного электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 200 с.
3. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. – М.: Высшая школа, 1987. – 248 с.
4. Глухивский Л.И., Биляковский И.Е. Расчет установившегося режима АД при его несинусоидальном питании // Техн. электродин. – 1988. – № 5. – С. 57-60.
5. Петрушин В.С. Влияние высших гармонических напряжений на характеристики асинхронного двигателя в электроприводе с фазовым управлением. Труды Одесского политехнического университета. – Вып. 1. – 1997. – С. 214-218.
6. Петрушин В.С., Якимец А.М. Исследование энергетических показателей асинхронных двигателей в динамических режимах при параметрическом управлении // Технічна електродинаміка. – 2001. – № 5. – С. 50-52.
7. Петрушин В.С., Якимец А.М., Петрушина З.В. Корректировка расчета механических характеристик асинхронных двигателей при фазовом управлении // Всеукр. наук.-техн. конф. "Проблемы автоматизации та електрообладнання транспортних засобів – ПАЕТЗ-2005". – Миколаїв: 2005. – Т. 2. – С. 164-169.
8. 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. – Вып. 70. – 2008. – С. 68-71.
9. Петрушин В.С. Учебное пособие "Асинхронные двигатели в регулируемом электроприводе" // Одесса: Наука и техника, 2006. – 320 с.

10. 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.

Bibliography (transliterated): 1. Braslavskij I.Ya. Asinhronnyj poluprovodnikovyj `elektroprivod s parametricheskim upravleniem. - M.: `Energoatomizdat, 1988. - 224 s. 2. Petrov L.P., Andryuschenko O.A., Kapinos V.I. i dr. Tiristornye preobrazovateli napryazheniya dlya asinhronnogo `elektroprivoda. - M.: `Energoatomizdat, 1986. - 200 s. 3. Kopylov I.P. Matematicheskoe modelirovanie `elektricheskikh mashin. - M.: Vysshaya shkola, 1987. - 248 s. 4. Gluhivskij L.I., Bilyakovskij I.E. Raschet ustanovivshegosya rezhima AD pri ego nesinusoidal'nom pitanii // Tehn. `elektrodin. - 1988. - № 5. - S. 57-60. 5. Petrushin V.S Vliyanie vysshikh garmonicheskikh napryazheniya na karakteristiki asinhronnogo dvigatelya v `elektroprivoде s fazovym upravleniem. Trudy Odesskogo politehnicheskogo universiteta.- Vyp. 1. - 1997.- S. 214-218. 6. Petrushin V.S., Yakimec A.M. Issledovanie `energeticheskikh pokazatelej asinhronnykh dvigatelej v dinamicheskikh rezhimakh pri parametricheskom upravlenii // Tehnichna elektrodinamika. - 2001. - № 5. - S. 50-52. 7. Petrushin V.S., Yakimec A.M., Petrushina Z.V. Korrekcirovka rascheta mehanicheskikh harakteristik asinhronnykh dvigatelej pri fazovom upravlenii // Vseukr. nauk.-tehn. konf. "Problemi avtomatiki ta elektroobladnannya transportnih zasobiv - PAETZ-2005". - Mikoлаїв: 2005. - T. 2. - S. 164-169. 8. Petrushin V.S., Yakimec A.M., Grusha A.V., Kalenik O.V. `Energeticheskie i teplovye pokazateli reguliruemyykh asinhronnykh dvigatelej s uchetom vysshikh prostranstvenno-vremennykh garmonik // Elektromashinobuduvannya ta elektroobladnannya: Mizhvid. nauk.-tehn. zb. - Vip. 70. - 2008. - S. 68-71. 9. Petrushin V.S. Uchebnoe posobie "Asinhronnye dvigately v reguliruemom `elektroprivoде" // Odessa: Nauka i tehnika, 2006. - 320s. 10. Petrushin V.S., Ryabinin S.V., Yakimec A.M. Programmnyj produkt "DIMASDrive". Programma analiza raboty, vybora i proektirovaniya asinhronnykh korotkozamknutykh dvigatelej sistem reguliruemogo `elektroprivoda (svidetel'stvo o registracii programmy PA№4065). Kiev: Ministerstvo obrazovaniya i nauki Ukrainy. Gosudarstvennyj departament intellektual'noj sobstvennosti, 26.03.2001.

Поступила 17.09.2012

Петрушин Виктор Сергеевич, д.т.н., проф.,
Якимец Андрей Миронович, к.т.н., доц.,
Бангула Владимир Борисович
Одесский национальный политехнический университет
кафедра "Электрические машины"
65044, Одесса, пр. Шевченко, 1
тел. (048) 7348494, e-mail: victor_petrushin@ukr.net

Petrushin V.S., Yakimets A.M., Bangula V.B.
Analysis of a thyristor voltage converter fed induction motor start.

A mathematical model of transient modes of asynchronous motor operation under phase control is experimentally confirmed to be valid. Both electrical and mechanical parameters and energy data are studied.

Key words – thyristor voltage converter, induction motor, smooth starting.