

СИСТЕМА ЧАСТОТНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ С НАБЛЮДАТЕЛЕМ УГЛА МЕЖДУ ВЕКТОРАМИ ТОКА СТАТОРА И ТОКА НАМАГНИЧИВАНИЯ

В.Н. Мешеряков (ЛГТУ, Лунец), О.В. Крюков (ООО «ТСН-электро», Н.Новгород)

Аннотация. В промышленности, особенно металлургии, используется большое количество ранее установленных электроприводов на базе асинхронного двигателя с фазным ротором с неэкономичными системами параметрического управления, достоинством которых является возможность выведения части энергии скольжения из цепи ротора, и способность получения повышенной кратности пускового тока. Использование частотных преобразователей в таком электроприводе позволяет регулировать скорость вращения поля статора и поддерживать на минимальном уровне скольжение и потери в цепи ротора. Однако при замыкании обмоток ротора накоротко снижается кратность пускового момента. Дополнительные возможности поддержания повышенного пускового момента асинхронного двигателя с фазным ротором при частотном управлении дает включение в цепь ротора частотно зависимого активно-индуктивного сопротивления (ИС). В этом случае электропривод будет частотно-параметрическим. Использование наблюдателя взаимного положения векторов тока статора и ротора, работающего на основе обработки измеренных сигналов мгновенных значений токов статора и ротора, позволяет построить систему скалярного управления с коррекцией тока статора, приближающей работу электропривода к режиму с минимальными потерями в обмотках двигателя.

Ключевые слова: частотно-параметрическое управление, асинхронный электропривод, бездатчиковая система, индукционное сопротивление, корректирующий наблюдатель вычисления угла.

Введение.

При частотном управлении электроприводом на базе асинхронного двигателя с фазным ротором (АДФР) в цепь ротора можно включать специальный электрический аппарат – индукционное сопротивление (ИС), имеющее активно-индуктивный характер, модуль и составляющие которого зависят от частоты тока ротора, что позволяет лучше стабилизировать величину пускового тока и момента двигателя при скалярной системе управления, не требующей использования датчика скорости (рис. 1) [1-3]. Привлекательность бездатчиковой системы особенно высока для механизмов, работающих в агрессивных средах, конвейеров, кранов, кантователей грузов и других механизмов металлургических производств и общепромышленных механизмов подъемно-транспортного назначения и нефтегазовой области [4-8].

Описание системы электропривода.

Система частотного управления двухканальная, первый канал задает частоту вращения двигателя, второй канал - напряжение, подводимое к обмотке статора. Система коррекции изменяет задание на величину напряжения.

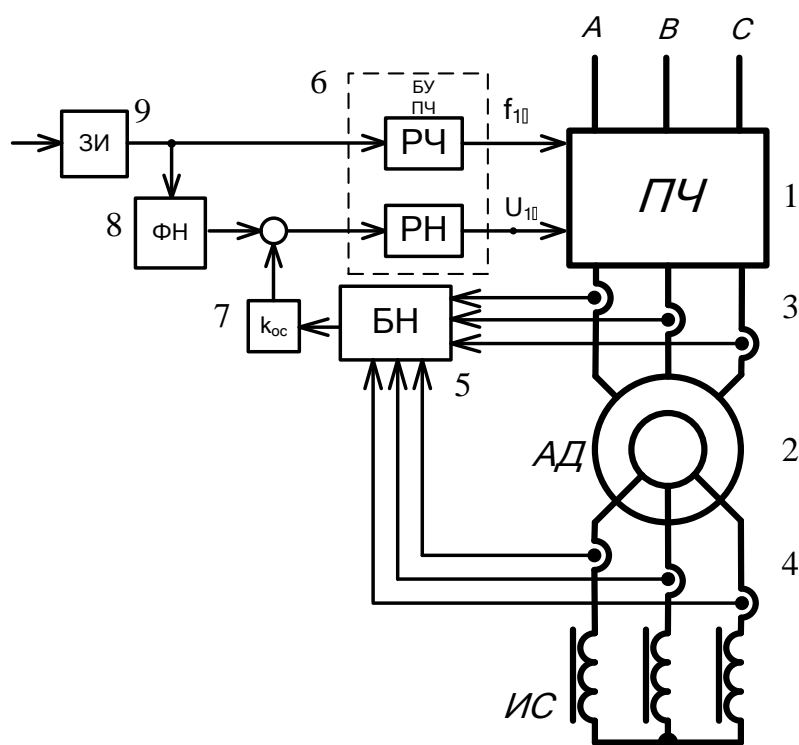


Рис. 1. Схема частотного асинхронного электропривода с ИС и блоком коррекции напряжения

Электропривод переменного тока содержит следующие основные элементы: 1 - асинхронный двигатель; 2 - преобразователь частоты с выпрямителем инвертором; 3 - датчики тока статора; 4 - датчики тока ротора; 5 – корректирующий блок наблюдателя, содержащий узел вычисления угла φ_0 и узел сравнения заданного и измеренного значений тангенса угла φ_0 ; 6 - блок управления преобразователем частоты, содержащий каналы регулирования частоты РЧ и регулирования напряжения РН; 7 - блок задания корректирующего напряжения ΔU ; 8 - формирователь закона регулирования напряжения, например ($\gamma = f(\alpha)$); 9 – задатчик интенсивности.

Трехфазный магнитопровод ИС может быть выполнен из трубчатых стержней, связанных в общую магнитную систему с помощью пассивного ярма (рис. 2).

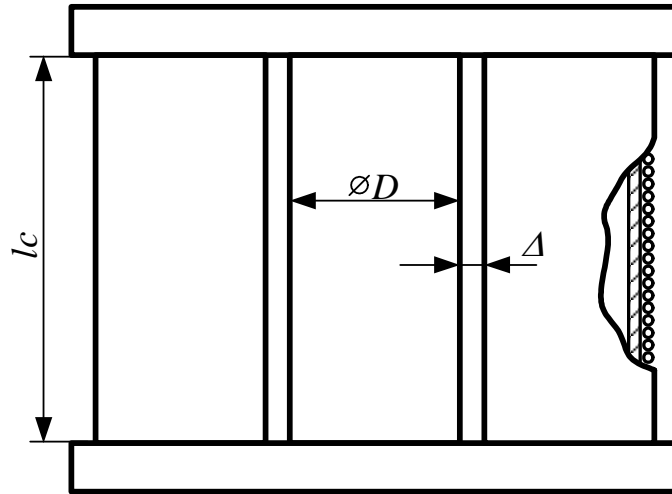


Рис. 2. Трехстержневая конструкция ИС с трубчатым магнитопроводом

Толщина массивных элементов сердечника обычно не превышает 5 мм, при этом с достаточной степенью точности сопротивление ИС можно определять по формулам [1], учитывающим явление поверхностного эффекта в массивных ферромагнитных телах:

$$\left. \begin{aligned}
 \underline{Z}_M &= r_M + jx_M = Z_M \cdot e^{j\varphi} = Z_M \cdot e^{j33,8^\circ} . \\
 r_M &= 0,83 \cdot Z_M ; \\
 x_M &= 0,56 \cdot Z_M ; \\
 x_M &= 0,67 \cdot r_M ; \\
 \varphi_M &= \arctg \frac{x_M}{r_M} = 33,8^\circ .
 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где Z_M , R_M , X_M – полное активное и индуктивное сопротивление магнитопровода.

Схема замещения фазы асинхронного двигателя с ИС приведена на рис. 3. При рассмотрении частотного управления асинхронным двигателем регулируемые параметры системы представляются в относительных единицах:

$$\alpha = \frac{f_1}{f_{1f}}; \quad \beta = \frac{f_2}{f_{1f}}; \quad \gamma = \frac{U_1}{U_{1f}}; \quad s_\alpha = \frac{\omega_1 - \omega}{\omega_1} , \quad (2)$$

где ω_1 – скорость вращения поля статора; ω - скорость вращения ротора.

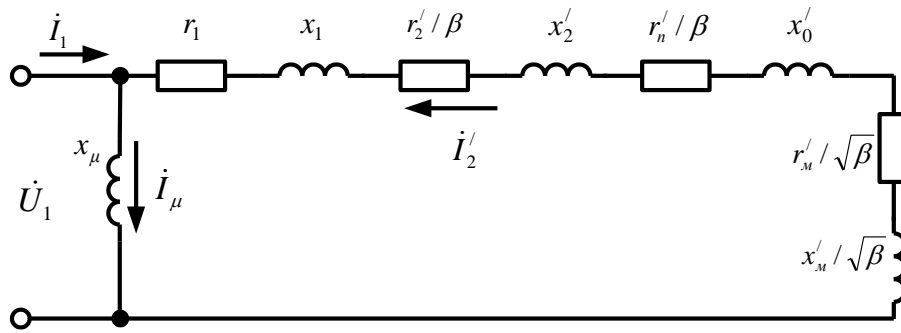


Рис. 3. Упрощенная Г-образная схема замещения асинхронного двигателя с ИС

На основании упрощенной Г-образной схемы замещения АДФР с ИС получено выражение для тока ротора в виде:

$$I_2' = \frac{U_1 \cdot \gamma}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{\alpha}{\beta} (r_2' + r_1') + r_M' \cdot \frac{\alpha}{\sqrt{\beta}} \right)^2 + \alpha^2 \cdot \left(x_1 + x_2' + x_0' + x_M' \cdot \frac{1}{\sqrt{\beta}} \right)^2}}, \quad (3)$$

где r_1 - сопротивление обмотки статора АДФР; r_2' - приведенное активное сопротивление обмотки АДФР; r_1' - приведенное активное сопротивление обмотки ИС; r_M' - приведенное активное сопротивления массивного магнитопровода ИС; x_1 - индуктивное сопротивления обмотки ротора; x_2' - приведенное индуктивное сопротивления обмотки ротора; x_0' - индуктивное сопротивления рассеяние обмотки ИС; x_M' - приведенное индуктивное сопротивления массивного магнитопровода ИС; β - абсолютное скольжение двигателя.

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ИС x_0' значительно меньше других сопротивлений схемы замещения, поэтому им можно пренебречь.

Электромагнитный момент АДФР с ИС определяется:

$$M = \frac{3I_2'^2}{\omega_1} \cdot \left[\frac{1}{s_\alpha} (r_2' + r_{II}') + r_M' \cdot \frac{1}{\sqrt{s_\alpha}} \right]. \quad (4)$$

Семейство механических характеристик асинхронного двигателя с фазным ротором МТФ112-6 при частотном управлении, полученные при соотношении сопротивлений магнитопровода ИС и обмотки ротора - $r_M = 0,75 \cdot r_2$, приведены на рис. 4.

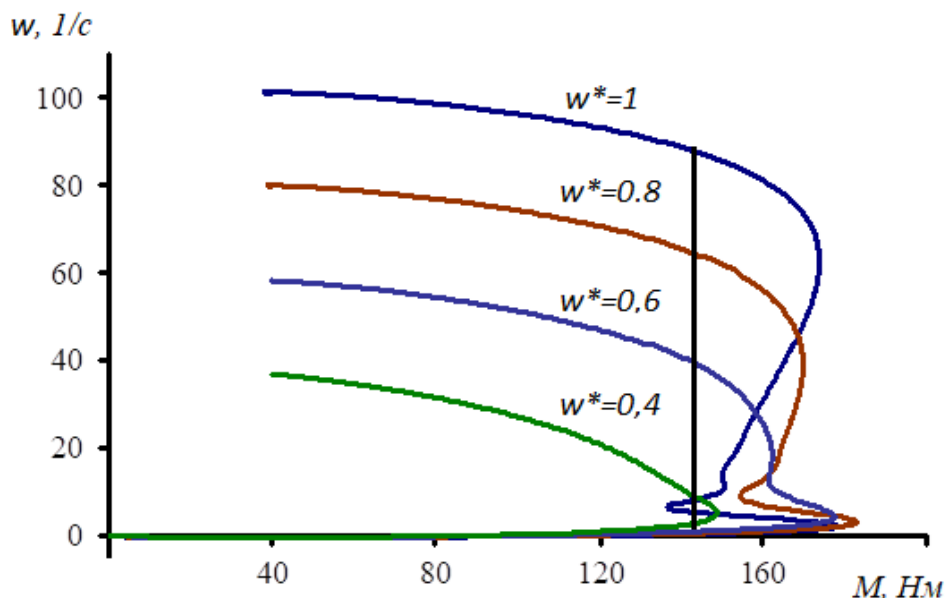


Рис. 4. Семейство механических характеристик асинхронного двигателя с фазным ротором МТФ112-6 при частотном управлении

Приведенные в литературе [9-11] результаты показывают, что повышение энергоэффективности систем частотного асинхронного электропривода с оптимальным управлением достигается в случае воздействия корректирующих средств, обеспечивающих поддержание угла между векторами тока статора и основного потокосцепления $\varphi_0 = 45^0$. Поскольку прямое измерение этого угла в системах скалярного частотного управления невозможно, разработаны различные наблюдатели этого угла, например, использующие в качестве исходных переменных доступные для измерения ток и напряжения статора. Однако такие системы имеют пониженную точность из-за необходимости фильтрации импульсных мгновенных значений напряжения статора [9].

В системе электропривода на базе асинхронного двигателя с фазным ротором для реализации оптимального частотного управления с поддержанием угла φ_0 на уровне, близком к оптимальному, в качестве базовой может быть

использована стандартная система скалярного частотного управления при ее соответствующей модернизации с использованием дополнительных блоков коррекции напряжения, в функции разности между заданным и измеренными значениями угла φ_0 или более легко определяемого тангенса этого угла (рис. 1).

Вычисление угла φ_0 между векторами тока статора и тока намагничивания выполняется в блоке наблюдателя 5 с использованием тригонометрического соотношения, полученного на основании рассмотрения векторной диаграммы (рис. 5)

$$\varphi_0 = \arcsin \frac{I_2 \cdot \cos \delta}{k_e \cdot I_1} \quad (5)$$

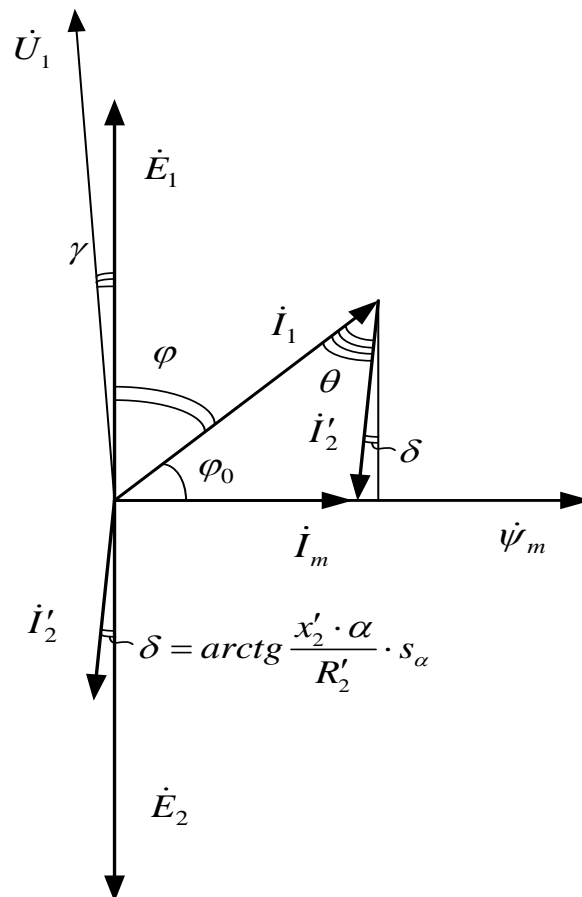


Рис. 5. Векторная диаграмма АД

При работе в режиме частотного пуска значение абсолютного скольжения β мало, поэтому угол δ не превышает 5° , тогда в первом приближении можно

принять $\cos \delta \approx 1$. Значения модулей векторов токов статора и ротора определяются на основании обработки мгновенных значений токов статора и ротора.

В блоке наблюдателе 5, получающем сигналы от датчиков фазных токов статора и ротора, производится выпрямление трехфазных напряжений, поступающих от датчиков тока статора и от датчиков тока ротора, полученные сигналы постоянного тока фильтруются, и производится вычисление отношения

$$\nu = \frac{U_{I_2}}{k_e \cdot U_{I_1}}. \quad (6)$$

Учитывая известные соотношения между обратными тригонометрическими функциями [12]

$$\arcsin \nu = \operatorname{arctg} \frac{\nu}{\sqrt{1-\nu^2}}, \quad (7)$$

получим выражение тангенса угла φ_0 в виде

$$\operatorname{tg} \varphi_0 = \operatorname{tg} \left(\arcsin \frac{U_{I_2}}{k_e \cdot U_{I_1}} \right) = \frac{\frac{U_{I_2}}{k_e \cdot U_{I_1}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{U_{I_2}}{k_e \cdot U_{I_1}} \right)^2}}. \quad (8)$$

Полученный сигнал сравнивается с заданным значением $\operatorname{tg} \varphi_{0\text{зад}} = 1$.

В блоке 7 задания корректирующего напряжения ΔU формируется сигнал коррекции, поступающий на сумматор в канал задания напряжения.

Корректирующее напряжение ΔU в общем случае может быть принято функцией разности сигналов $\Delta \operatorname{tg} \varphi_0$ желаемого и измеренного значений тангенса искомого угла.

$$\Delta U = f(\Delta \operatorname{tg} \varphi_0). \quad (9)$$

В результате проведенных исследований было установлено соотношение, определяющееся квадратичной зависимостью между напряжением и моментом асинхронного двигателя

$$\frac{\Delta U}{E_{2k} \cdot \gamma} = \sqrt{\frac{\delta \Delta \omega}{\omega_0}}, \quad (10)$$

где E_{2k} – ЭДС неподвижного ротора при номинальном напряжении статора;
 $\delta\Delta\omega$ - желаемое приращение абсолютного отклонения угловой скорости по сравнению с нескорректированной системой.

В соответствии с [9]

$$\Delta\omega_{omn} = \frac{R'_2}{p_n(L'_{2\sigma} + L_m)}, \quad (11)$$

где L'_2 – индуктивность рассеяния обмотки ротора; L_m – индуктивность намагничивания двигателя; p_n - число пар полюсов АД.

Тогда из выражений (10)-(11) получим требуемое значение величины корректирующего напряжения

$$\Delta U = \sqrt{\frac{R'_2 \cdot (1 - \operatorname{tg} \varphi_0)}{p_n \cdot (L'_{2\sigma} + L_m) \cdot \omega_0}} \cdot E_{2k} \cdot \gamma. \quad (12)$$

Осуществляя поддержание постоянства угла $\varphi_0 = 45^\circ$, можно обеспечить примерное постоянство пускового момента асинхронного двигателя при реализации частотного пуска (рис. 4). Кратность пускового тока достигается на уровне $K = 1,8-2$ по отношению к номинальному моменту.

Выводы. Введение блока коррекции в стандартную систему частотного управления асинхронным двигателем с фазным ротором, содержащего ИС в цепи ротора, позволяет форсировать напряжение в начальный момент пуска и обеспечить стабилизацию пускового момента асинхронного двигателя при частотном управлении с диапазоном регулирования частоты вращения до 10:1.

Список литературы

1. Власов В.Г. Экспериментальные исследования и методика расчета асинхронных двигателей с индукционным сопротивлением в цепи ротора/ В.Г. Власов // Электротехническая промышленность Сер. Электропривод. 1967. №293. С.3–6.

2. Шумков Е.Б., Епифанов В.П., Завьялов Н.С. Энергетические особенности электроприводов с индукционными реостатами // Промышленная энергетика. 1979. № 1. С. 26–28.

3. Мещеряков В.Н., Бойков А.И., Муравьев А.А., Пикалов В.В., Ласточкин Д.В. The electric drive on the basis of the induction machine with an induction resistance in the rotor circuit connected through valve elements // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. 2019. № 2. С. 60-66.

4. Kryukov O.V., Gulyaev I.V., Teplukhov D.Y. Method for stabilizing the operation of synchronous machines using a virtual load sensor // Russian Electrical Engineering. 2019. Т. 90. № 7. С. 473-478.

5. Belousov A.S., Meshcheryakov V.N., Valtchev S. Development of a control algorithm for three-phase inverter in two-phase electric drives reducing the number of commutations // В сборнике: Proceedings - 2019 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2019. 2019. С. 444-449. DOI: 10.1109/summa48161.2019.8947487.

6. Крюков О.В. Алгоритмы быстрого преобразования Уолша в микропроцессорных системах управления электроприводом // Известия ВУЗов. Электромеханика. 2005. №4. С.39-44.

7. Kryukov O.V., Blagodarov D.A., Dulnev N.N., Safonov Y.M., Fedortsov N.N., Kostin A.A. Intelligent control of electric machine drive systems // В сб.: 2018 10th International Conference on Electrical Power Drive Systems, ICEPDS 2018 - Conference Proceedings 10. 2018. С. 8571670.

8. Крюков О.В. Оценка эксплуатационных факторов электроприводных газоперекачивающих агрегатов по нормативным требованиям мониторинга // Контроль. Диагностика. 2018. № 10. С. 50-57.

9. Мещеряков В.Н., Шпиганович А.А., Мещерякова О.В., Данилов В.В. Асинхронный электропривод с частотно-токовым управлением и системой коррекции сигналов задания амплитуды и частоты тока статора / // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2018. №1. С. 21-29.

10. Мещеряков В.Н., Цветков П.Е., Мещерякова О.В. Асинхронный электропривод с поддержанием оптимального угла между моментобразующими векторами // Вести вузов Черноземья. 2013. №1. С.17-21.

11. Мищенко В.А. Перспективы развития векторного управления электроприводами / V Международная (XVI всероссийская) конференция по автоматизированным электроприводам. АЭП-2007.СПб, 2007. С.60-63.

12. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров // М.: Наука. 1970. 720 с.