

Естественные характеристики асинхронизированного вентильного электродвигателя на базе инвертора напряжения

Казаков Ю.Б., Гуляев И.В., доктора техн. наук, Юшков И.С., Шумилов Е.А., аспиранты

Выполнено сравнение результатов математического моделирования и экспериментальных данных режимов работы асинхронизированного вентильного электродвигателя на базе инвертора напряжения. Показаны преимущества и рассчитаны характеристики такого двигателя.

Ключевые слова: асинхронизированный вентильный электродвигатель, преобразователь частоты, IGBT-модуль.

Natural Characteristics of Asynchronized Valve Electrical Motor Based on the Voltage Inverter

Yu.B.Kazakov, Doctor of Engineering, I.V. Gulyaev, Doctor of Engineering, I.S. Yushkov, Post Graduate Student, E.A. Shumilov, Post Graduate Student

The authors compare the mathematical modeling results and the results of experimental data modes of asynchronized valve electric motor based on the voltage inverter. The article presents advantages and characteristics of the engine.

Keywords: asynchronized valve electric motor, frequency converter, IGBT module.

Совершенствование электромеханических преобразователей, принципов управления ими, развитие полупроводниковой техники и элементной базы позволило к настоящему времени создать электромашино-вентильные системы как частично, так и полностью управляемые. В асинхронизированном вентильном двигателе (АВД) на основе асинхронной машины с фазным ротором, включенной в режиме двойного питания, системой управления (СУ) и преобразователями частоты в цепях статора и ротора (рис. 1) [1, 2] при питании роторной обмотки напряжением низкой частоты в машине формируется вращающееся магнитное поле, которое может обеспечивать коммутацию тока в фазах. Возможно инверсное включение. Такой двигатель имеет, по сравнению с другими типами электрических машин, наибольшие возможности воздействия на процесс преобразования энергии в электро-механической системе – по амплитуде и частоте напряжения питания роторных обмоток, по амплитуде напряжения питания и фазе тока статорных обмоток, что, однако, требует наличия двух преобразователей частоты с соответствующими системами управления.

По сравнению с вентильным двигателем постоянного тока, АВД, возбуждаемый со стороны ротора трехфазным переменным током низкой частоты, обладает преимуществами: возможностью коммутации тока в фазах якоря в стопорном режиме, отсутствием датчика положения ротора, возможностью рекуперативного торможения до полной остановки.

При использовании инвертора тока система управления преобразователя частоты синхронизируется по наведенной в цепи якоря

ЭДС (управление по фазе ЭДС), а в случае питания от инвертора напряжения систему управления преобразователя частоты якоря можно синхронизировать по фазным токам, протекающим в обмотке якоря (управление по фазе тока). В начале вращения ротора выходная частота преобразователя частоты якоря (ПЧ) автоматически увеличивается на величину частоты вращения.

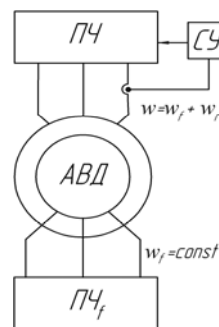


Рис. 1. Структурная схема АВД

Для системы управления выбран микроконтроллер TMS320F2812, позволяющий формировать импульсы управления IGBT-модулями. Его исходными сигналами являются аналоговый сигнал, поступающий на компаратор, собранный на операционном усилителе КР544УД2, который преобразуется в прямоугольные импульсы. Их период равен периоду тока якоря, что позволяет вычислить частоту токов якоря. Микроконтроллер определяет период входного сигнала, по которому синхронизируется и выдает импульсы управления, сдвинутые на 120 электрических градусов, для формирования импульсов управления всех

трех фаз преобразователя частоты якоря. Кроме того, созданная программа микроконтроллера позволяет дополнительно управлять фазой между выходным напряжением и током ПЧ якоря во всем диапазоне рабочих частот. Также в программе предусмотрена возможность корректировки данного угла для исключения рекуперации энергии скольжения обмоткой возбуждения. Понижение частоты токов в обмотках АД приводит к снижению магнитных потерь и повышению КПД двигателя в целом.

Коммутации в цепи якоря АД при неподвижном роторе за счет низкой частоты возбуждения обеспечивают большую перегрузочную способность машины и меньшие ограничения в режиме упора, чем вентильный двигатель постоянного тока.

При анализе работы АД приняты следующие допущения: на статоре и роторе асинхронной машины размещены симметричные трехфазные обмотки; не учитываются потери в стали, изменение степени насыщения и падение напряжения в IGBT-модулях.

Режимы работы АД описываются системой комплексных уравнений в координатах, вращающихся синхронно с напряжением обмотки якоря:

$$\begin{cases} \dot{U} = r \dot{I} + (p' + jv s_0)(x \cdot \dot{I} + x_{ar} \cdot \dot{I}_f), \\ \dot{U}_f = r_f \dot{I}_f + (p' + jv s_0)(x_{ar} \cdot \dot{I} + x_{\sigma f} \cdot \dot{I}_f), \\ Jp' \frac{\omega}{p} = \frac{3}{2} p \cdot x_{ar} [\dot{I} \cdot \dot{I}_f] + M, \end{cases} \quad (1)$$

где \dot{U} , \dot{U}_f – обобщенные векторы напряжений якоря и возбуждения; r , r_f – активные сопротивления обмоток якоря и возбуждения; v , s_0 – относительная частота токов якоря и возбуждения; x_{σ} , $x_{\sigma f}$, x_{ar} – индуктивные сопротивления рассеяния обмоток якоря и возбуждения, индуктивное сопротивление взаимной индуктивности; x , x_f – индуктивные сопротивления обмоток якоря и возбуждения; \dot{I} , \dot{I}_f – обобщенные векторы токов якоря и возбуждения; $\dot{\Psi}$ – обобщенный вектор потокоцепления; M – электромагнитный момент на валу двигателя.

Векторная диаграмма работы двигателя представлена на рис. 2.

Квазистатические режимы работы АД для первых гармоник напряжений и токов описываются следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} \dot{U} = (r + jv x_{\sigma}) \cdot \dot{I} + jv \dot{\Psi}, \\ \dot{U}_f = (r_f + j s_0 x_f) \cdot \dot{I}_f + j s_0 \dot{\Psi}, \\ \dot{\Psi} = x (\dot{I} + \dot{I}_f), \\ M = \text{Re } j \cdot \dot{\Psi} \cdot \dot{I}. \end{cases} \quad (2)$$

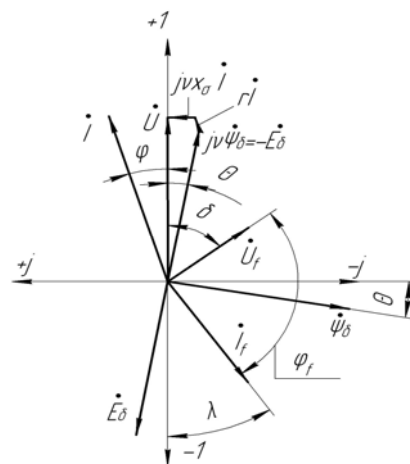


Рис. 2. Векторная диаграмма АД

Зависимость амплитуд гармонических составляющих линейного напряжения якоря АД, питающегося от зависимого инвертора напряжения, от величины напряжения звена постоянного тока преобразователя частоты определяется соотношением [3]

$$U_{nm} = \frac{2\sqrt{3} U_d}{\pi n},$$

где n – номер гармоники; U_d – напряжение звена постоянного тока преобразователя частоты.

Действующее значение фазных напряжений рассчитывается как

$$U_{\text{фаз}} = \frac{\sqrt{2}}{3} U_d.$$

Для реализации преобразователя частоты якоря использовался преобразователь частоты серии «Омега» производства завода «Электровыпрямитель» (г. Саранск) с допустимыми параметрами тока якоря 125 А и напряжением 0,380 В. В качестве датчика фазного тока применяется компенсационный датчик на эффекте холла LT 100-S\SP96 фирмы LEM, рассчитанный на ток 100 А и включенный в цепь системы управления преобразователя частоты якоря. Датчиком линейного напряжения является компенсационный датчик на эффекте холла LV 25-Р, рассчитанный на диапазон напряжений от 10 до 500 В.

Разложив систему (2) по проекциям на мнимую и действительную оси, можно получить математическую модель квазиустановившихся режимов АД:

$$\begin{aligned}
 & \frac{U_f \cdot (s_0 \cdot x_{f\sigma} \cdot \cos(\delta + \lambda) + r_f \cdot \sin(\lambda + \delta))}{s_0^2 \cdot x_{f\sigma} \cdot \cos(\lambda + \theta) + s_0 \cdot r_f \cdot \sin(\lambda + \theta)} = \\
 & = \frac{U \cdot (r \cdot \sin \varphi + v \cdot x_{\sigma} \cdot \cos \varphi)}{v \cdot r \cdot \sin(\varphi + \theta) + v^2 \cdot x_{\sigma} \cdot \cos(\varphi + \theta)}, \\
 & \operatorname{tg} \lambda = \frac{(r \cdot \sin \varphi + v \cdot x_{\sigma} \cdot \cos \varphi) \cdot \cos \theta + \sin \theta \cdot v \cdot x_{ar} \cdot \sin \varphi}{(r \cdot \sin \varphi + v \cdot x_{\sigma} \cdot \cos \varphi) \cdot \sin \theta + \sin \theta \cdot v \cdot x_{ar} \cdot \cos \varphi}, \\
 & \operatorname{tg} \delta = \frac{l_f (s_0 \cdot x_{f\sigma} \cdot \cos \lambda + r_f \cdot \sin \lambda) + s_0 \cdot \Psi \cdot \sin \theta}{l_f (s_0 \cdot x_{f\sigma} \cdot \sin \lambda - r_f \cdot \cos \lambda) + s_0 \cdot \Psi \cdot \cos \theta}, \\
 & I = \frac{U \cdot \sin \theta}{r \cdot \sin(\varphi + \theta) + v \cdot x_{\sigma} \cdot \cos(\varphi + \theta)}, \\
 & I_f = \frac{r \cdot I \cdot \sin \varphi + v \cdot x_{\sigma} \cdot I \cdot \cos \varphi + v \cdot x_{ar} \cdot I \cdot \cos \varphi}{v \cdot x_{ar} \cdot \cos \lambda}, \\
 & \Psi = \frac{U \cdot (r \cdot \sin \varphi + v \cdot x_{\sigma} \cdot \cos \varphi)}{v \cdot r \cdot \sin(\varphi + \theta) + v^2 \cdot x_{\sigma} \cdot \cos(\varphi + \theta)}, \\
 & M = \frac{U_f \cdot U \cdot \sin \theta \cdot \cos(\varphi + \theta)}{(s_0^2 \cdot x_{f\sigma} \cdot \cos(\lambda + \theta) + s_0 \cdot r_f \cdot \sin(\lambda + \theta))} \times \\
 & \times \frac{(s_0 \cdot x_{f\sigma} \cdot \cos(\delta + \lambda) + r_f \cdot \sin(\lambda + \delta))}{(r \cdot \sin(\varphi + \theta) + v \cdot x_{\sigma} \cdot \cos(\varphi + \theta))}, \quad (3)
 \end{aligned}$$

где θ – угол между обратными обобщенными векторами ЭДС и напряжения якоря, который может быть определен как угол нагрузки; φ – угол между обобщенными векторами тока и напряжения якоря; λ – угол между отрицательной действительной осью и обобщенным вектором тока возбуждения; δ – угол между обобщенными векторами напряжений якоря и возбуждения;

$$\Omega = (v - 1) \frac{\omega_2}{p} - \text{угловая частота ротора.}$$

Математическая модель реализована на базе пакета математического моделирования MATLAB. Создан m-файл, в котором в качестве исходной принята система уравнений (3). Неизвестными в данной системе являются следующие параметры: углы δ , λ , θ ; частота токов якоря v ; модуль вектора потокосцепления Ψ ; электромагнитный момент M ; модули токов якоря и возбуждения I , I_f . В качестве исходных значений принимаются напряжения возбуждения U_f и якоря U , параметры базового двигателя x , x_f , x_{σ} , $x_{\sigma f}$, x_{ar} , r , r_f ; частота возбуждения s_0 . Система уравнений решается численным методом Ньютона-Гаусса.

Под естественными характеристиками АД подразумеваются механические характеристики двигателя без введения каких-либо обратных связей, т. е. при заданных значениях напряжений U , U_f и поддержании $\varphi = \text{const}$, $s_0 = \text{const}$ при любых нагрузках (в пределах статической устойчивости).

Разработана методика расчета электро-механических характеристик АД. На рис. 3 приведены экспериментальные и расчетные механические характеристики двигателя.

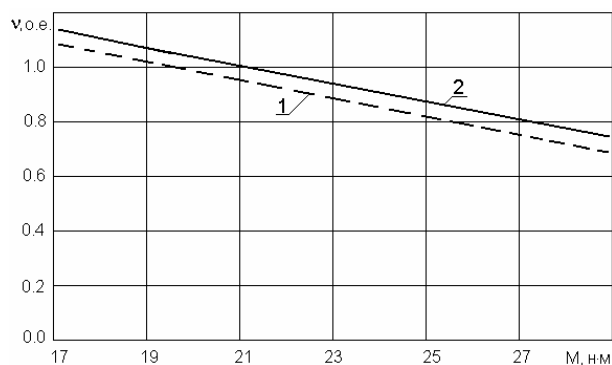


Рис. 3. Механическая характеристика АД: 1 – расчетная; 2 – экспериментальная

Эти характеристики соответствуют электромагнитным параметрам физической модели на базе асинхронного двигателя с фазным ротором 4AK160M4Y3 с параметрами T-образной схемы замещения: $x = 1,090147$ Ом, $x_f = 1,105783$ Ом, $x_{\sigma} = 0,066424$ Ом, $x_{\sigma f} = 0,08206$ Ом, $x_{ar} = 1,023723$ Ом, $r = 0,037119$ Ом, $r_f = 0,048664$ Ом; частота возбуждения 10 Гц или ($s_0 = 0,2$); угол опережения инвертора напряжения якоря $\beta = 20^\circ$, что соответствует углу сдвига фаз между током и напряжением якоря ($\varphi = 20^\circ$); напряжение возбуждения низкой частоты $U_f = 5$ В; напряжение якоря $U = 90$ В (по условию эксперимента).

Все электрические и механические параметры снимаются посредством соответствующих измерительных датчиков через аналого-цифровые преобразователи комплекса LabView фирмы National Instruments. Созданное программное обеспечение позволяет обрабатывать информацию и определять действующие значения токов, напряжений, частот, мощностей, коэффициента мощности и момента на валу через мгновенные значения, снятые с частотой дискретизации 100000 выборок в секунду [4]. Механические характеристики АД близки к характеристикам двигателя постоянного тока с независимым возбуждением. Соответственно и рабочие характеристики АД будут близки к характеристикам двигателя постоянного тока.

Скоростная характеристика для приводов с мощным АД при малых значениях активного сопротивления якоря – жесткая в диапазоне номинальных нагрузок. Лучшие энергетические показатели и перегрузочную способность имеет привод при $\varphi = 0^\circ$ в связи со снижением размагничивающего действия реакции якоря на основной магнитный поток.

Заключение

У предлагаемого нами варианта АД отсутствует проблема пуска и ввода в синхронизм. Устранены присущие вентиляторным двигателям постоянного тока ограничения по работе

в режиме упора, так как при частоте вращения ротора $\omega_r = 0$ в обмотке якоря наводится ЭДС низкой фиксированной частоты. Режимы упора и низких частот вращения являются для АД рабочими, не вызывающими значительных перегрузок по току преобразователей и фазных обмоток.

Использование в цепи ротора (возбуждения) собственного низкочастотного ($5\div 10$ Гц) преобразователя частоты позволяет исключить рекуперацию энергии скольжения обмоткой возбуждения, понизить частоту токов в обмотках АД, что приводит к снижению магнитных потерь и повышению КПД.

Разработанные математические модели АД и алгоритм расчета характеристик показывают, что механические характеристики АД близки к характеристикам двигателя постоянного тока с независимым возбуждением.

Экспериментальные исследования физических моделей АД показали хорошую работоспособность в стопорном и перегрузочных режимах, подтвердили обоснованность математических моделей.

Список литературы

1. **Асинхронизированный** вентильный двигатель с ортогональным управлением / И.П. Копылов, Ю.П. Сонин, И.В. Гуляев, А.А. Вострухин // Электротехника. – 2002. – № 9. – С. 2–5.
2. **Патент РФ №87303**. Устройство для управления инвертором напряжения вентильного двигателя / И.В. Гуляев, Г.М. Тутаяев, И.С. Юшков; Бюл. №27, 2009.
3. **Розанов Ю.К., Рябчинский М.В., Квасюк А.А.** Силовая электроника. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007.
4. **Свидетельство** об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2009615450 «Программа обработки экспериментальных исследований электропривода» / И.В. Гуляев, Г.М. Тутаяев, И.С. Юшков, М.В. Ильин; Мордовский госуниверситет им. Н.П. Огарева.

Казаков Юрий Борисович,
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой электромеханики,
телефон (4932) 26-97-06,
e-mail: elmash@em.ispu.ru

Гуляев Игорь Васильевич,
Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева,
доктор технических наук, профессор, декан факультета электронной техники,
телефон (8342) 47-66-69,
адрес: г. Саранск, ул. Большевикская, 68,
e-mail: ivgulyaev@mail.ru

Юшков Игорь Сергеевич
Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева,
аспирант кафедры автоматизации,
адрес: г. Саранск, ул. Большевикская, 68,
e-mail: yushkovigor@gmail.com

Шумилов Егор Алексеевич
Сызранский филиал Самарского государственного технического университета,
аспирант кафедры ЭПА,
адрес: г. Сызрань, ул. Советская, 45,
e-mail: dancers155@rambler.ru