

УДК 613.313.29(075.8.)

ВЕКТОРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ

¹Егоров И.Н., ²Шабает В.А.

¹Государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир, e-mail: egorovmtf@mail.ru;

²ПАО «Научно-исследовательский проектно-конструкторский и технологический институт электромашиностроения», Владимир, e-mail: V.Shabaev@ruselprom.ru

Определено понятие вектора тока применительно к вентильно-индукторным двигателям с самовозбуждением по коэффициенту одновременности работы фаз. Показано, что при коэффициенте одновременности работы фаз, равном трем, при специальной форме тока и специальной форме изменения индуктивностей фаз, вентильно-индукторных двигателей возможно векторное управление током и моментом. Приведены структурные схемы мехатронных систем и передаточные функции регуляторов вектора тока и положения с внутренними контурами регулирования момента и скорости шестифазного реверсивного вентильно-индукторного двигателя. Разработана структурная схема разомкнутой шестифазной вентильно-индукторной мехатронной системы с частотно-токовым регулированием и автоматическим формированием напряжения фаз. Определена передаточная функция замкнутого регулятора скорости. Разработана структурная схема следящего адаптивного вентильно-индукторного привода с контурами регулирования момента, скорости и положения.

Ключевые слова: мехатронная система, шестифазный реверсивный вентильно-индукторный двигатель, индуктивность фаз, структурная схема, передаточная функция

VECTOR CONTROL VALVE-INDUCTOR MOTOR MECHATRONIC SYSTEMS

¹Egorov I.N., ²Shabaev V.A.

¹State University of AG and NG Stoletovs, Vladimir, e-mail: egorovmtf@mail.ru;

²PAO «Research Design and Technology Institute of Electrical Engineerin», Vladimir, e-mail: V.Shabaev@ruselprom.ru

The concept of the current vector with respect to the valve-inductor motor with self-excitation at a rate of simultaneous operation phases was defined. It is shown that with a coefficient equal to the simultaneous operation of three phases, with the special shape of the current and the special form of change of inductance phase, gate-inductor motors possible current vector control and torque. The block diagram of mechatronic systems and transfer functions of regulators and the provisions of the current vector control loops with internal torque and speed reversing valve-six-phase inductor motor are shown. The block diagram of the open-valve-six-phase inductor mechatronic systems with frequency-current control and automatic generation of voltage phases is developed. The transfer function of the closed speed control is determined. The block diagram of the adaptive servo valve-inductor drive circuits control of the time, speed and position was determined.

Keywords: mechatronic system, six-phase reversing valve-inductor motor, inductance phase, a block diagram, transfer function

Вентильно-индукторные двигатели (ВИД), несмотря на разнообразие конструкций и разное число фаз, можно разделить на три большие группы [5]: с самовозбуждением; с независимым электромагнитным возбуждением; с магнитоэлектрическим возбуждением. С одной стороны, ВИД представляют собой электрохимические преобразователи с электромагнитным способом преобразования энергии, форма токов фаз которых существенно отличается от формы напряжения, а с другой стороны, они являются вентильно-индукторной мехатронной системой (ВИМС) вследствие конструктивного единства электрохимического преобразователя энергии (двигателя) с силовым преобразователем (инвертором), датчика положения и микропроцессорного устройства управления. При отсутствии какой-либо из перечисленных компонент, ВИМС становится неработоспособной.

Традиционным способом управления вентильно-индукторными двигателями (ВИД) мехатронных систем является частотное управление [6], характеризующееся недостаточной жесткостью механических характеристик из-за «тяговой» характеристики двигателей [8, 9], высоким уровнем шумов и вибрации [2, 9] и большой мощностью полупроводниковых приборов инвертора. Увеличение диапазона регулирования скорости, быстродействия, точности поддержания скорости или момента и расширение функциональных возможностей ВИМС привело к необходимости применения алгоритмов векторного и бездатчикового векторного управления [3, 8].

В случае идеального холостого хода, при регулировании напряжения или тока ВИД, как аналог двигателя с последовательным возбуждением описывается передаточной функцией интегрирующего звена. Следовательно,

На рис. 1 обозначено: $W_{\text{ШРВИД}}$ – передаточная функция ШРВИД; I_3 – заданное значение амплитуды вектора тока; I_{oc} – амплитуда вектора тока обратной связи; U – амплитуда вектора напряжения; E_p , E_L – ЭДС от изменения тока и индуктивности; Ω – частота вращения; R_n – приведенное значение омического сопротивления; $C_E = \frac{E_p + E_L}{\Omega}$ – коэффициент, определяющий

Э.Д.С. в зависимости от частоты вращения и нелинейно изменяющийся в зависимости от амплитуды вектора тока; $K_{\text{дт}}$ – коэффициент передачи датчика тока; I_n – приведенное значение амплитуды вектора тока; M , M_n – моменты ШРВИД и его нагрузки;

$C_M = \frac{M}{I_n}$ – коэффициент момента ШРВИД, нелинейно изменяющийся в зависимости от амплитуды приведенного вектора тока; J – суммарный момент инерции ШРВИД и механизма, приведенного к его валу; Ω – частота вращения; $S = d/dt$.

Автоматическое формирование напряжения фаз особенно важно при применении ВИД в качестве маршевых электродвигателей транспортных мехатронных систем, когда в соответствии с техническими условиями на контактную сеть постоянного тока троллейбусов и трамваев напряжение питания может изменяться от 500 до 800 В.

Если формирование напряжения фаз происходит автоматически, то внутренние обратные связи по ЭДС можно не учитывать. При этом структурная схема разомкнутой ВИМС с ШРВИД и частотно-токовым регулированием принимает вид, показанный на рис. 2.

Коэффициент момента ШРВИД, несмотря на нелинейный характер зависимости от амплитуды приведенного вектора тока, при постоянной температуре определяется однозначно. Зависимость момента от частоты вращения в механизмах с вентиляторной нагрузкой также является однозначной. В других видах механизмов, например при применении ШРВИД в качестве маршевого двигателя на электротранспорте, определить зависимость момента от частоты вращения не представляется возможным.

Суммарный приведенный момент инерции ШРВИД и механизма может изменяться в несколько раз за счет изменения массы нагрузки (например, за счет изменения числа пассажиров троллейбуса). Вследствие этого ВИД, даже с системой частотно-токового регулирования, является объектом с переменными параметрами, что приводит к необходимости применения нелинейного токового управления [7].

Передаточная функция ВИМС, показанной на рис. 2, в операторной форме будет иметь вид

$$W_I = \frac{\Omega}{I_3} = KC_M \frac{\frac{1}{Js}}{\frac{K_{(M,\Omega)}}{Js} + 1} = \frac{KC_M}{\frac{M_n}{\Omega} \left(\frac{\Omega J}{M_n} s + 1 \right)} = \frac{\Omega}{M_n} \frac{KC_M}{\frac{\Omega}{M_n} Js + 1} \quad (4)$$

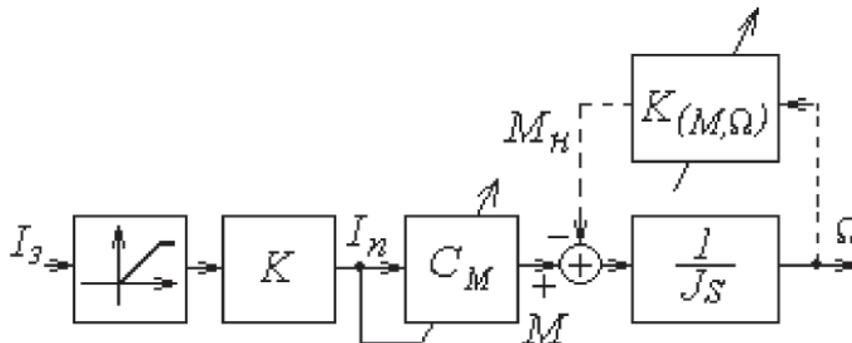


Рис. 2. Структурная схема разомкнутой ВИМС с ШРВИД, частотно-токовым регулированием и автоматическим формированием напряжения фаз: $K_{(M,\Omega)}$ – коэффициент, определяющий зависимость момента от частоты вращения

Момент ШРВИД не пропорционален амплитуде вектора тока, однако при постоянной температуре использование нелинейного блока, моделирующего зависимость $M_{oc} = f(I_n)$ в цепи обратной связи, или использование нелинейного блока, моделирующего зависимость $I_3 = f(M_3)$ в прямой цепи, дает возможность реализовать линейную характеристику контура регулирования момента ШРВИД.

Контур регулирования момента, используемый в качестве внутреннего контура регулирования скорости, является аperiodическим звеном первого порядка,

имеет «тяговую» характеристику и широко применяется в ВИМС электротранспорта и других подвижных объектов. Так как увеличение коэффициента передачи пропорционального регулятора скорости, при «тяговой» характеристике контура момента приводит к увеличению диапазона регулирования и снижению его помехоустойчивости, то более целесообразно применение пропорционально-интегрального регулятора.

Передаточная функция замкнутого контура регулирования скорости следящего адаптивного вентильно-индукторного привода МС (рис. 3) равна

$$W_{pc} = \frac{\frac{K_0(T_0s+1)}{s} K_M \frac{C_M}{\frac{M_H}{\Omega} \left(\frac{\Omega}{M_H} Js + 1 \right)}}{\frac{K_0(T_0s+1)}{s} K_M \frac{C_M}{\frac{M_H}{\Omega} \left(\frac{\Omega}{M_H} Js + 1 \right)} K_\Omega + 1}; \quad (5)$$

$$\text{При } K_0 = \frac{M_H}{\Omega} \text{ и } T_0 = \frac{\Omega}{M_H} \quad (6)$$

$$W_{pc} = \frac{\frac{K_M C_M}{s}}{\frac{K_M C_M}{s} K_\Omega + 1} = \frac{1}{K_\Omega \left(\frac{1}{K_M C_M K_\Omega} s + 1 \right)}. \quad (7)$$

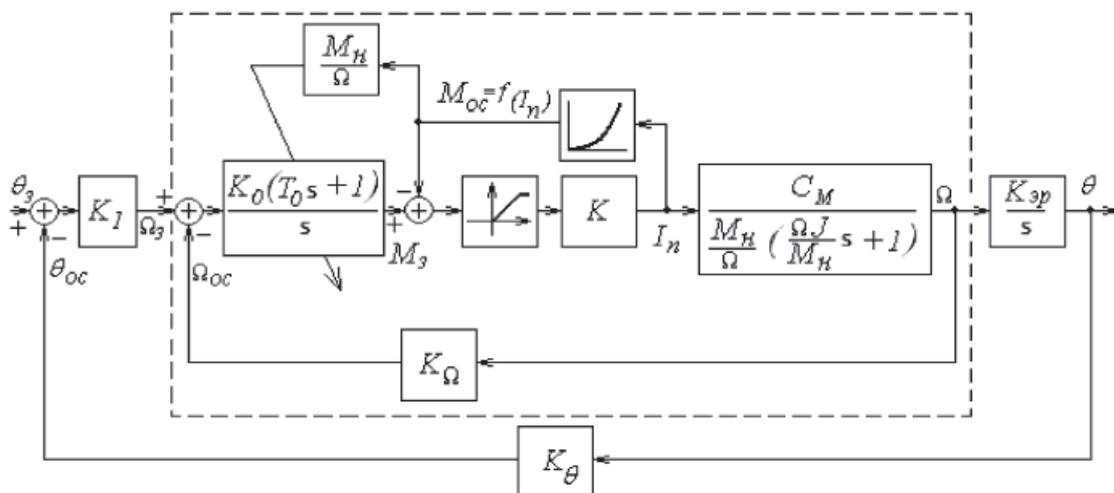


Рис. 3. Структурная схема следящего адаптивного вентильно-индукторного привода МС:
 $K_{Эр}$ – коэффициент электромагнитной редукции

Применение в качестве регулятора скорости изодромного звена с переменными параметрами позволяет увеличить статическую и динамическую жесткость контура регулирования скорости. Контур регулирования скорости с таким алгоритмом управления является адаптивной системой регулирования с параметрической настройкой [4]. Для настройки параметров изодромного звена в функции отношения момента нагрузки к скорости необходима информация о величинах и законах изменения скорости и момента ВИМС. Измерение скорости обеспечивается датчиком скорости, дифференцированием сигнала датчика положения и наблюдателем скорости. Получение информации о моменте нагрузки является сложной технической задачей, так как момент M , развиваемый двигателем, уравнивается моментом нагрузки M_n и динамической составляющей момента

$$M_n = M - \frac{d\Omega}{dt} J. \quad (8)$$

Следовательно, для определения момента нагрузки, на основании выражения (8) необходимо иметь информацию как об ускорении, так и приведенном моменте инерции.

Структурная схема следящего адаптивного вентильно-индукторного привода МС с «жесткими» механическими характеристиками, разработанного в ПАО «НИПТИЭМ», показана на рис. 3.

Механические характеристики данного привода при регулировании момента являются «жесткими». При размыкании обратных связей по скорости и положению ВИМС ориентированы в первую очередь на использование в электротранспорте, кранах, лифтах, робототехнике и технологических системах с вентиляторной нагрузкой.

Выводы

1. В качестве понятия вектора тока, применительно к ВИД, предложено использовать сумму текущих токов фаз.

2. При коэффициенте одновременности работы фаз, равном трем, амплитуда векторов тока и момента не зависит от положения ротора, если ток имеет форму «детектированной синусоиды», а индуктивности фаз изменяются линейно в зависимости от угла поворота ротора. Реализовать такую форму тока можно при помощи частотно-токового управления.

3. Представление передаточных функций ВИМС с ЧНВИД и ШРВИД в виде апериодических звеньев первого порядка с переменными параметрами позволяет синтезировать адаптивные регуляторы векторов тока, момента, скорости и положения. Это улучшает параметры ВИМС и делает их инвариантными к моменту нагрузки.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 13-08-01364).

Список литературы

1. Бродовский В.Н., Иванов Е.С. Приводы с частотно-токовым управлением / под ред. В.Н. Бродовского. – М.: Энергия, 1974. – С. 12–14.
2. Виноградов А.Б. Минимизация пульсаций электромагнитного момента вентильно-индукторного электропривода // Электричество. – 2008. – № 2. – С. 39–49.
3. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2008. – 298 с.
4. Егоров И.Н., Шабаев В.А. Адаптивный электропривод // Машиностроитель. – 1983. – № 2. – С. 17–18.
5. Козаченко В.Ф. Вентильно-индукторный привод – перспективное направление развития современного регулируемого электропривода / В.Ф.Козаченко, А.М. Русаков, А.В. Сорокин, Ю.И. Кочанов, А.А. Ионов, Д.В. Тарасов // Новости теплоснабжения. – 2011. – № 11 (135).
6. Кузнецов В.А., Кузьмичев В.А. Вентильно-индукторный двигатель. – М.: Изд-во МЭИ, 2003. – 70 с.
7. Малафеев С.И., Шабаев В.А., Захаров А.В. Анализ электромагнитного момента вентильно-индукторного двигателя в мехатронной системе с нелинейным токовым управлением // Электротехника. – 2006. – № 3. – С. 37–42.
8. Островерхов Н.Я. Система векторного управления тяговым вентильно-индукторным электроприводом // Электротехнические и компьютерные системы. – 2014. – № 15 (91). – С. 41–44.
9. Шабаев В.А. Управление электромеханическими преобразователями энергии с различными механическими характеристиками // Электротехника. – 2015. – № 3. – С. 23–27.
10. Шабаев В.А. Анализ источников шума вентильно-индукторного двигателя // Электротехника. – 2005. – № 5. – С. 62–64.

References

1. Brodovskij V.N., Ivanov E.S. Privody s chastotno-tokovym upravleniem/pod red. V.N. Brodovskogo. M.: Jenergiya. 1974. pp. 12–14.
2. Vinogradov A.B. Minimizaciya pulsacij ehlektromagnitnogo momenta ventilno-induktornogo ehlektroprivoda // EHlektrichestvo. 2008, no. 2. pp. 39–49.
3. Vinogradov A.B. Vektornoe upravlenie ehlektroprivodami peremennogo toka / GOUVPO «Ivanovskij gosudarstvennyj ehnergeticheskij universitet imeni V.I. Lenina». Ivanovo, 2008. 298 p.
4. Egorov I.N., Shabaev V.A. Adaptivnyj jelektroprivod // Mashinostroitel. 1983, no. 2. pp. 17–18.
5. Kozachenko V.F. Ventilno-induktornyj privod – perspektivnoe napravlenie razvitiya sovremennogo reguliruемого ehlektroprivoda / V.F.Kozachenko, A.M. Rusakov, A.V. Sorokin, YU.I. Kochanov, A.A. Ionov, D.V. Tarasov // Novosti teplonasbheniya. 2011, no. 11 (135).
6. Kuznecov V.A., Kuzmichev V.A. Ventilno-induktornyj dvigatel. M.: Izd-vo MEl. 2003. 70 p.
7. Malafeev S.I., Shabaev V.A., Zaharov A.V. Analiz jelektromagnitnogo momenta ventilno-induktornogo dvigatelja v mehatronnoj sisteme s nelinejnym tokovym upravleniem. // Jelektrotehnika. 2006. no. 3. pp. 37–42.
8. Ostroverhov N.YA. Sistema vektornogo upravleniya tyagovym ventilno-induktornym ehlektroprivodom // EHlektrotekhnicheskie i kompyuternye sistemy. 2014, no. 15 (91). pp. 41–44.
9. Shabaev V.A. Upravlenie ehlektromekhanicheskimi preobrazovateljami ehnergii s razlichnymi mekhanicheskimi harakteristikami // Jelektrotehnika. 2015. no. 3. pp. 23–27.
10. Shabaev V.A. Analiz istochnikov shuma ventilno-induktornogo dvigatelja // Jelektrotehnika. 2005. no. 5. pp. 62–64.