

УДК 677.023:62-83
DOI 10.47367/0021-3497_2021_2_104

**О ПРИМЕНЕНИИ И СТРУКТУРАХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ
ТЕКСТИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

**ON APPLICATION AND STRUCTURES OF CONTROL SYSTEMS
OF VALVE-INDUCTOR ELECTRIC DRIVES
OF PROCESS MACHINES AND EQUIPMENT
OF TEXTILE INDUSTRY**

И.Н. ЕГОРОВ, В.А. ШАБАЕВ, И.С. ПОЛЗУНОВ

I.N. EGOROV, V.A. SHABAEV, I.S. POLZUNOV

**(Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых)**

(Vladimir State University named after Alexander and Nikolai Stoletovs)

E-mail: egorovmtf@mail.ru

В статье приведены структурные схемы и передаточные функции регуляторов вектора тока и положения шестифазного реверсивного вентильно-индукторного двигателя, разомкнутой шестифазной вентильно-индукторной мехатронной системы с частотно-токовым регулированием и автоматическим формированием напряжения фаз, следящего адаптивного вентильно-индукторного привода.

The article presents structural diagrams and transfer functions of current vector regulators and position of the six-phase reversible gate-inductor motor, open six-phase gate-inductor mechatron system with frequency-current control and automatic generation of phase voltage, following adaptive gate-inductor drive.

Ключевые слова: текстильная машина, электропривод, система управления, шестифазный реверсивный вентильно-индукторный двигатель, структурная схема.

Keywords: textile machine, electric drive, control system, six-phase reversing valve- inductor motor, a block diagram.

Существенное ужесточение требований к показателям надежности, экономичности и быстродействия систем электроприводов (ЭП) текстильных машин приводит, например, к необходимости: рассмотрения математических моделей технологического процесса и обрабатываемого материала в качестве элемента модели системы ЭП [1...5]; для повышения быстродействия системы регулирования натяжения введения дополнительного канала силового воздействия на полотно [2], [3]. Это, в свою очередь, приводит к целесообразности применения позиционно-силового управления мехатронными системами [6].

Усложнение математических моделей систем управления ЭП приводит к внедрению методов структурно-параметрического синтеза [1] систем оптимального и модального управления ЭП с регуляторами повышенного порядка, безынерционных регуляторов состояния, динамических полиномиальных регуляторов и регуляторов с наблюдателями состояния. Многократные изменения приведенных моментов инерции, свойств материалов и других параметров обрабатываемых изделий приводит [1] к необходимости обеспечения робастности, селективной инвариантности и адаптивных свойств систем управления ЭП.

К другим путям совершенствования и повышения эффективности мехатронных систем текстильных поточных линий следует отнести совершенствование частотно-регулируемого асинхронного электропривода [4], [5] и рассмотрения вопросов применения других типов ЭП. Одной из возможных альтернатив асинхронному ЭП являются вентильно-индукторные ЭП (ВИП) [7...9].

Вентильно-индукторные двигатели (ВИД) представляют собой электромеханические преобразователи с электромагнитным способом преобразования энергии, а с другой стороны, вследствие конструктивного единства электромеханического преобразователя энергии (двигателя) с силовым преобразователем (инвертором), датчика положения и микропроцессорного устройства управления они являются вен-

тильно-индукторной мехатронной системой (ВИМС).

Традиционным способом управления ВИД является частотное управление [7], характеризующееся недостаточной жесткостью механических характеристик из-за "тяговой" характеристики двигателей [9], [10], высоким уровнем шумов и вибрации [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 [9].

В случае идеального холостого хода, при регулировании напряжения или тока ВИД, как аналог двигателя с последовательным возбуждением, описывается передаточной функцией интегрирующего звена. Если момент нагрузки не равен нулю, то ВИД описывается передаточной функцией апериодического звена первого порядка, коэффициент передачи и постоянная времени которого изменяются в зависимости от отношения частоты вращения и момента нагрузки. Следовательно, ВИД можно рассматривать в виде звена с переменными параметрами, что дает возможность обеспечивать его работу только во второй зоне регулирования с максимальным значением отношения момента на валу ВИД к амплитуде вектора тока. В качестве понятия амплитуды вектора тока, применительно к ВИД, авторы предлагают использовать сумму текущих значений токов фаз ВИД:

$$I = \sum_1^n i_n, \quad (1)$$

где I – амплитуда вектора тока ВИД; i_n – текущее значение тока фазы; n – номер фазы. Чтобы амплитуда вектора тока не зависела от положения ротора, необходимо:

$$I = \sum_1^n i_n = \text{const.} \quad (2)$$

Условия 1 и 2 могут быть выполнены, если токи фаз имеют форму "детектированной синусоиды" со сдвигом, равным 60 электрических градусов. В этом случае токи фаз не имеют разрывов производных при $i_n \neq 0$, что позволяет свести к минимуму шуму и вибрации. Такие формы токов фаз могут быть использованы в ВИД, имеющих коэффициент одновременности работы фаз $K_o = 3$, то есть в четырех- и шестифазных нереверсивных и реверсивных ВИД (ЧНВИД, ШРВИД). При этом крутящий момент на валу будет определяться как:

$$\sum_1^n M_n = \sum_1^n \frac{i_n^2}{2} \frac{dL_n}{d\theta}, \quad (3)$$

где M_n – момент, возникающий благодаря протеканию тока по фазе n ; L_n – индуктивность фазы n ; θ – угловое положение ротора.

Если суммарный момент в соответствии с выражением (3) $\sum_1^n M_n = \text{const}$, то

$\frac{dL_n}{d\theta} = \text{const}$, то есть в процессе вращения при токах фаз, имеющих форму "детектированной синусоиды" со сдвигом равным 60 электрических градусов, индуктивности фаз должны изменяться линейно.

Структурная схема разомкнутой шестифазной ВИМС с частотно-токовым регулированием по методу "токового коридора" показана на рис. 1.

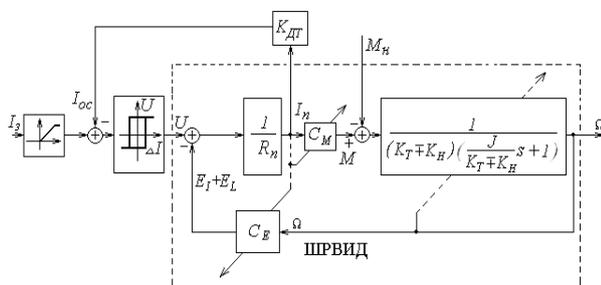


Рис. 1

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 и автоматическим формированием напряжения фаз ($K_{(M,\Omega)}$ – коэффициент, определяющий зависимость момента от частоты вращения) принимает вид, показанный на рис. 2.

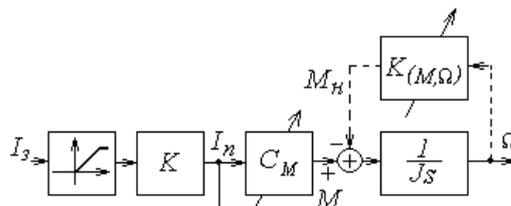


Рис. 2

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.

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

$$W_i = \frac{\Omega}{I_3} = K_{CM} \frac{1}{J_s} = \frac{K_{CM}}{J_s \frac{K_{(M,\Omega)}}{J_s} + 1} = \frac{M_n}{\Omega} \left(\frac{\Omega}{M_n} s + 1 \right) = \frac{\Omega}{M_n} \frac{K_{CM}}{J_s + 1}. \quad (4)$$

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 $I_3 = f(M_n)$ 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 и имеет "тяговую" характеристику. 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.

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 (рис. 3) [11]. 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_H и динамической составляющей момента:

$$M_H = M - \frac{d\Omega}{dt} J. \quad (5)$$

Структурная схема следящего адаптивного вентильно-индукторного привода МС (K_θ – коэффициент электромагнитной редукции) с "жесткими" механическими характеристиками, разработанного в ПАО "НИПТИЭМ", показана на рис.3.

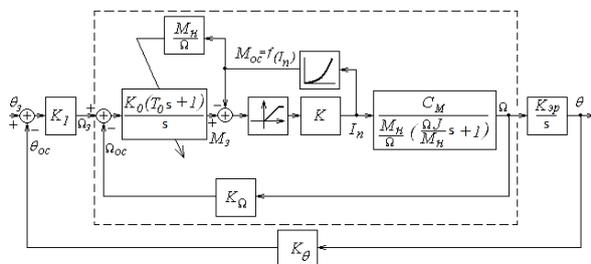


Рис. 3

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.

В Ы В О Д Ы

Амплитуда векторов тока и момента при коэффициенте одновременности работы фаз, равном трем, 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. Представление передаточных функций ВИМС с ЧНВИД и ШРВИД в виде аperiodических звеньев первого порядка с переменными параметрами позволяет синтезировать адаптивные регуляторы векторов тока, момента, скорости и положения.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Тарарыкин С.В., Тютиков В.В., Анисимов А.А., Копылова Л.Г., Аполонский В.В. Структурно-параметрический синтез и цифровая реализация регуляторов мехатронных систем / Под ред. С.В. Тарарыкина. – Иваново: ИГЭУ, 2019.
2. Глазунов В.Ф. Регулирование технологических параметров обрабатываемых текстильных материалов средствами автоматизированного электропривода // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2016, № 4. С. 131...135.
3. Глазунов В.Ф., Вилков П.В. Стабилизация натяжения ткани в оборудовании непрерывного действия // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2011, № 3. С. 110...113.
4. Глазунов В.Ф., Виноградов А.Б., Шишков К.С. Асинхронный электропривод механизма формирования сновальных валов // Вестник ИГЭУ. – 2011, вып 1. С. 81...87.
5. Глазунов В.Ф. О построении электропривода механизмов намотки сновальных валов // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2014, №6. С. 95...98.
6. Егоров И.Н. Позиционно-силовое управление робототехническими и мехатронными устройствами. – Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2010.

7. *Виноградов А.Б.* Векторное управление электроприводами переменного тока. – Иваново: Изд-во ИГЭУ, 2008.

8. *Козаченко В.Ф., Русаков А.М., Сорокин А.В., Кочанов Ю.И., Ионов А.А., Тарасов Д.В.* Вентильно-индукторный привод - перспективное направление развития современного регулируемого электропривода // *Новости теплоснабжения.* – 2011, №11 (135). С.24...26.

9. *Островерхов Н.Я.* Система векторного управления тяговым вентильно-индукторным электроприводом // *Электротехнические и компьютерные системы.* – 2014, №15 (91). С. 41...44.

10. *Шабаетов В.А.* Управление электромеханическими преобразователями энергии с различными механическими характеристиками // *Электротехника.* – 2015. №3. С.23...27.

11. *Егоров И.Н., Шабаетов В.А.* Адаптивный электропривод // *Машиностроитель.* – 1983, №2. С.17...18.

REFERENCES

1. Tararykin S.V., Tyutikov V.V., Anisimov A.A., Kopylova L.G., Apolonskiy V.V. Strukturno-parametricheskii sintez i tsifrovaya realizatsiya regulyatorov mekhatronnykh sistem / Pod red. S.V. Tararykina. – Ivanovo: IGEU, 2019.

2. Glazunov V.F. Regulirovanie tekhnologicheskikh parametrov obrabatyvaemykh tekstil'nykh materialov sredstvami avtomatizirovannogo elektroprivoda // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* – 2016, № 4. S. 131...135.

3. Glazunov V.F., Vilkov P.V. Stabilizatsiya natyazheniya tkani v oborudovanii nepreryvnogo deystviya // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii,*

Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. – 2011, № 3. S. 110...113.

4. Glazunov V.F., Vinogradov A.B., Shishkov K.S. Asinkhronnyy elektroprivod mekhanizma formirovaniya snoval'nykh valov // *Vestnik IGEU.* – 2011, vyp 1. S. 81...87.

5. Glazunov V.F. O postroenii elektroprivoda mekhanizmov namotki snoval'nykh valov // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* – 2014, №6. S. 95...98.

6. Egorov I.N. Pozitsionno-silovoe upravlenie robototekhnicheskimi i mekhatronnymi ustroystvami. – Vladimir: Izd-vo Vladim. gos. un-ta, 2010.

7. Vinogradov A.B. Vektornoe upravlenie elektroprivodami peremennogo toka. – Ivanovo: Izd-vo IGEU, 2008.

8. Kozachenko V.F., Rusakov A.M., Sorokin A.V., Kochanov Yu.I., Ionov A.A., Tarasov D.V. Ventil'no-induktornyiy privod - perspektivnoye napravleniye razvitiya sovremennogo reguliruемого elektroprivoda // *Novosti teplosnabzheniya.* – 2011, №11 (135). S.24...26.

9. Ostroverkhov N.Ya. Sistema vektornogo upravleniya tyagovym ventil'no-induktornym elektroprivodom // *Elektrotekhnicheskie i komp'yuternye sistemy.* – 2014, №15 (91). S. 41...44.

10. Shabaev V.A. Upravlenie elektromekhanicheskimi preobrazovatelyami energii s razlichnymi mekhanicheskimi kharakteristikami // *Elektrotehnika.* – 2015. №3. S.23...27.

11. Egorov I.N., Shabaev V.A. Adaptivnyy elektroprivod // *Mashinostroitel'.* – 1983, №2. S.17...18.

Рекомендована кафедрой менеджмента и маркетинга. Поступила 23.09.20.