

УДК 681.532.55

Т. С. Буканова, канд. техн. наук, ст. преподаватель, BukanovaTS@volgatech.net,

М. Т. Алиев, канд. техн. наук, доц.,

Поволжский государственный технологический университет

Микропроцессорная система электропривода на основе двухроторной электрической машины с дифференциальным управлением

Представлена структура управляемого электропривода на основе двухроторной электрической машины с дифференциальным управлением. Рассмотрена практическая реализация, принцип работы и характеристики микропроцессорной системы блока управления нагрузкой для регулирования частоты вращения двухроторной электрической машины с двумя дифференциально взаимосвязанными роторами.

Ключевые слова: микропроцессорная система, электрическая машина, электропривод, двухроторная электрическая машина

Введение

Реализация технологических процессов в промышленности в подавляющем большинстве случаев предполагает использование электропривода для приведения в действие рабочих органов технологических машин. С развитием вычислительной техники для решения задач регулирования параметров движения рабочего органа технологического аппарата средствами электропривода применяют два основных метода частотного управления: скалярное и векторное управление.

Метод скалярного управления [1—6] достаточно прост в реализации, но обладает существенными функциональными недостатками. Для обеспечения качественного управления характеристиками необходима установка датчиков скорости и момента на валу двигателя, однако при этом управление становится инерционным, а сам электропривод увеличивается как по массогабаритным параметрам, так и по стоимости. Кроме того, принцип скалярного управления не позволяет управлять одновременно и моментом, и скоростью, поэтому приходится выбирать.

Метод векторного управления [7—13] использует переменные электрического двигателя (тока статора, потокосцепления) в виде векторной физической величины — направленного вектора, который обладает амплитудой и фазой. Управление именно совокупностью этих параметров во времени лежит в основе векторного принципа. Свойства системы достигаются за счет разделения каналов регулирования потокосцепления и скорости вращения электродвигателя. Векторные системы управления позволяют реализовать управление как скоростью, так и моментом на валу двигателя, однако их аппа-

ратная реализация характеризуется высокой стоимостью компонентов, большой вычислительной сложностью и необходимостью знать параметры двигателя для расчета оптимальных параметров.

При решении задач управления невысокой сложности достоинством однопроцессорных систем является простота аппаратной и программной реализации. Однако при этом к микроконтроллеру предъявляются повышенные требования по наличию встроенных периферийных модулей и портов ввода-вывода, по быстродействию и объему памяти; значительно усложняется разработка программного обеспечения.

Большинство применяемых в промышленности преобразователей строятся на двухпроцессорной основе. Первый процессор выполняет основные функции преобразователя частоты (реализация алгоритмов управления инвертором, выпрямителем, опрос датчиков и т. д.), второй обеспечивает работу пульта управления, связь с системой верхнего уровня и другие сервисные функции. При этом снижаются требования к микропроцессорам по встроенной периферии, быстродействию и объему памяти; упрощается разработка программного обеспечения для каждого из контроллеров. Управление преобразователем может осуществляться с помощью пульта, дискретных или аналоговых входов.

Основным направлением технического перевооружения промышленности является внедрение современных систем автоматического управления на базе единых модулей, объединяющих собственно электромеханические компоненты с силовой электроникой, которые управляются микроконтроллерами, персональными компьютерами или другими вычислительными устройствами.

Целью данной работы является разработка микропроцессорной системы электропривода на основе двухроторной электрической машины с дифференциальным управлением.

Двухроторная электрическая машина с дифференциальным управлением

Для управления рабочим органом технологического аппарата предложено использовать двухроторную электрическую машину (ДЭМ) с дифференциальным управлением с (ДУ) [14]. ДЭМ с ДУ состоит из двух взаимосвязанных подсистем: двигательной и генераторной. В отличие от обычных двигателей, когда управление выходными характеристиками происходит в результате изменения параметров подводимой энергии — тока, напряжения, частоты, в представленной электрической машине управление происходит путем изменения модуля тормозного момента, действующего со стороны генераторной обмотки на промежуточный ротор электрической машины, который дифференциально взаимосвязан с внутренним ротором [15]. Дифференциальная взаимосвязь предполагает такое конструктивное исполнение и электромагнитную связь промежуточного и основного роторов электрической машины, что в установившихся режимах обеспечивается постоянство их относительной скорости вращения. Таким образом, дифференциальное управление частотой вращения ДЭМ заключается в целенаправленном воздействии (в виде разгона или торможения ротора) на дополнительно введенный для управления промежуточный ротор системы двух дифференциально взаимосвязанных роторов в целях достижения заданного состояния, например стабилизации частоты вращения основного ротора.

Реализация дифференциального управления предполагает изменение сопротивления нагрузки в цепи обмотки генераторной части ДЭМ с ДУ в целях управления частотой вращения внутреннего ротора [16].

Микропроцессорная система управления нагрузкой двухроторной электрической машины

Управляемый электропривод, в котором в качестве электромеханического устройства применена ДЭМ с ДУ, традиционно можно разделить на следующие части:

- механическую часть, включающую в себя непосредственно электро-механическое устройство — ДЭМ с ДУ, сопряженную с механической нагрузкой;
- силовую часть, представляющую собой управляемый выпрямитель напряжения для преобразования переменного тока в постоянный и управляемую нагрузку обмотки дополнительной части ДЭМ с ДУ — блок управления нагрузкой (БУН);

- управляющую часть, представляющую собой терминальную систему управления (ТСУ) электроприводом, основное назначение которой — формирование сигналов управления для изменения нагрузки по результатам анализа процессов на основании предложенной математической модели ДЭМ с ДУ.

Структурная схема электропривода на основе ДЭМ с ДУ представлена на рис. 1.

ДЭМ с ДУ соединена с сетью переменного напряжения общепромышленного назначения. В результате роторы ДЭМ начинают вращаться. Внутренний ротор ДЭМ с ДУ соединен с механической нагрузкой электропривода и предназначен для приведения в действие рабочего органа технологической машины с частотой вращения ω_1 . При функционировании ДЭМ с ДУ происходит вращение промежуточного ротора с частотой ω_2 .

Дополнительная часть ДЭМ с ДУ соединена с БУН через управляемый выпрямитель напряжения, формирующий шину постоянного тока. БУН содержит управляемую коммутируемую матрицу полезной нагрузки (МПН), которая включена в цепь обмотки дополнительной части. Управление значением нагрузки происходит по сигналу n , определяющему число подключаемых в качестве нагрузки дополнительной части элементов МПН — значение сопротивления R_n . При вращении дополнительного ротора и подключенной к обмотке статора нагрузки R_n МПН возникает электрический ток I , протекающий по нагрузке.

ТСУ представляет собой компьютерную управляющую систему, которая на основе значения протекающего по нагрузке и обмотке дополнительной части электрического тока I восстанавливает текущие параметры ДЭМ с ДУ. На основе анализа восстановленных параметров, в частности частоты вращения внутреннего ротора ω_1 , и заданной требуемой частоты вращения $\omega_{1\text{треб}}$ происходит расчет требуемой нагрузки $R_{n\text{треб}}$ в обмотке дополнительной части и формирование сигнала управления n . Процесс управления электроприводом на основе ДЭМ с ДУ заключается в подстройке частоты вращения внутреннего ротора электропривода ω_1 и сводится к управлению значением нагрузки R_n МПН дополнительной части ДЭМ с ДУ. Для изменения электрического сопротивления R_n в цепи дополнительной части включен БУН.



Рис. 1. Структурная схема управляемого электропривода на основе двухроторной электрической машины с дифференциальным управлением

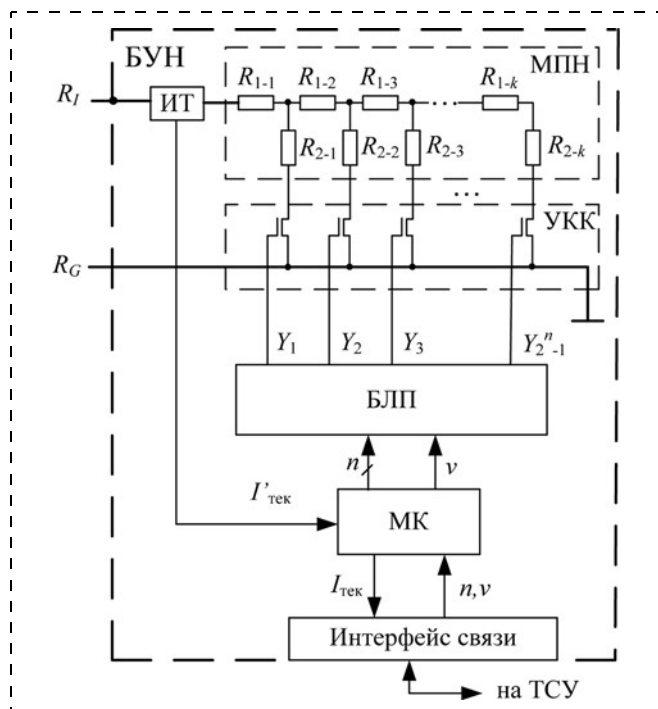


Рис. 2. Функциональная схема микропроцессорной системы блока управления нагрузкой:
ИТ — измеритель тока; МПН — матрица полезной нагрузки; УКК — управляемые коммутируемые ключи; БЛП — блок логического преобразования; БУН — блок управления нагрузкой; МК — микроконтроллер; ТСУ — терминальная система управления

Таблица 1

Таблица истинности блока логического преобразования (вариант 1)

№	Входы				Выходы ($v = 1$)					
	X_n	...	X_2	X_1	Y_1	Y_2	Y_3	...	$Y_{(2-2)}^n$	$Y_{(2-1)}^n$
1	0	...	0	0	0	0	0	...	0	0
2	0	...	0	1	1	0	0	...	0	0
3	0	...	1	0	1	1	0	...	0	0
4	0	...	1	1	1	1	1	...	0	0
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
$2^n - 1$	1	...	1	0	1	1	1	...	1	0
2^n	1	...	1	1	1	1	1	...	1	1

Таблица 2

Таблица истинности блока логического преобразования (вариант 2)

№	Входы				Выходы ($v = 1$)					
	X_n	...	X_2	X_1	Y_1	Y_2	Y_3	...	$Y_{(2-2)}^n$	$Y_{(2-1)}^n$
1	0	...	0	0	0	0	0	...	0	0
2	0	...	0	1	1	0	0	...	0	0
3	0	...	1	0	0	1	0	...	0	0
4	0	...	1	1	0	0	1	...	0	0
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
$2^n - 1$	1	...	1	0	0	0	0	...	1	0
2^n	1	...	1	1	0	0	0	...	0	1

БУН состоит из МПН, управляемых коммутируемых ключей (УКК), блока логического преобразования (БЛП), микроконтроллера (МК) и измерителя тока (ИТ) (рис. 2).

МПН представляет собой электрическую цепь из повторяющихся элементарных нагрузок с двумя номиналами R_{1-k} и R_{2-k} . Каждый отвод нагрузки R_{2-k} МПН соединен с общей шиной через УКК. Ключ предназначен для включения или выключения в цепь нагрузки. Ключ замкнут, когда соответствующий ему выходной сигнал БЛП равен единице, и наоборот. В качестве управляемых ключей, коммутирующих отводы МПН на общую шину, используются полевые транзисторы. Исходя из структуры МПН БУН реализует дискретное изменение сопротивления R_n , включаемого в цепь дополнительной части ДЭМ с ДУ в зависимости от управляющего сигнала с БЛП. Представленная МПН позволяет равномерно распределять выделяемую мощность, избегая перегрева отдельных элементов.

БУН функционирует следующим образом. Сигналом управления v с ПК определяется вариант функционирования БЛП, который по цифровому n -разрядному сигналу управления ТСУ формирует исполнительные дискретные воздействия. Первый вариант ($v = 1$) принципа функционирования БЛП представлен в табл. 1.

В данном случае согласно табл. 1 двоичный код на выходе ТСУ преобразуется в числовое значение. Каждый выход Y_k БЛП управляет соответствующим ключом отвода ячейки МПН, причем согласно табл. 1 значению "0" соответствует неподключенная ячейка, а значению "1" — подключенная ячейка МПН БУН. Таким образом, сигналы с БЛП определяют замыкание ключей соответствующего отвода МПН и число подключенных ячеек матрицы БУН.

При n -разрядном сигнале управления ТСУ возможно 2^n вариантов управляющих сигналов, обеспечивающих подключение $k = (2^n - 1)$ ячеек МПН БУН. Каждое из 2^n состояний БУН определяет значение сопротивления R_n и силу тока в цепи дополнительной части электропривода. Дискретность изменения характеристик определяется величиной $k = 2^n - 1$ и соответствует числу дискретных значений, которые принимает нагрузка R_n дополнительной части ДЭМ с ДУ. Этим обусловлено число возможных частот вращения внутреннего ротора электропривода. Диапазон изменения характеристик определяется величиной k и нагрузками R_{1-k} и R_{2-k} МПН БУН.

Сопротивление МПН $R_{k(1)}$ при подключении k ячеек согласно табл. 1 соответствует электрической

нагрузке R_H дополнительной части и определяется по формуле

$$R_{k(1)} = R_{1-1} + R'_i, \\ R'_i = \begin{cases} R_{1-1}, & \text{если } i = 1; \\ \left(\frac{(R_{1-i} + R'_{i+1}) R_{2-(i-1)}}{R_{1-i} + R'_{i+1} + R_{2-(i-1)}} \right)_{i=2, \overline{k}}, & \text{если } i \geq 2, \end{cases} \quad (1)$$

где при $i = k$ значение $R'_{(i+1)} = R_2 - i$.

Ток I_k на выходе МПН определяется по формуле

$$I_k = \frac{U_0}{R_k}, \quad (2)$$

где U_0 — напряжение на выходе дополнительной части ДЭМ с ДУ.

Вторым вариантом функционирования БЛП ($v = 2$) является принцип управления коммутируемыми ключами, представленный в табл. 2.

Согласно табл. 2 при n -разрядном двоичном коде управления с ТСУ определяется замыкание только одного ключа, реализуя преобразование из двоичного кода в позиционный. Таким образом, позиция коммутируемого ключевого элемента определяет значение сопротивления R_H МПН в цепи обмотки дополнительной части ДЭМ с ДУ.

Сопротивление МПН $R_{k(2)}$ при подключении k -го отвода согласно табл. 2 соответствует нагрузке R_H дополнительной части ДЭМ с ДУ и определяется по формуле

$$R_{k(2)} = R_2 - k + \sum_{i=1}^k R_{1-i}. \quad (3)$$

Характеристика изменения сопротивления МПН R_k при различных вариантах коммутации отводов представлена на рис. 3.

При последовательном подключении ($v = 1$) отводов от нулевого до k -го происходит ступенчатое уменьшение значение сопротивления МПН с экспоненциальным характером. Во втором случае коммутации ($v = 2$) обеспечивается равномерное ступенчатое линейное увеличение сопротивления МПН

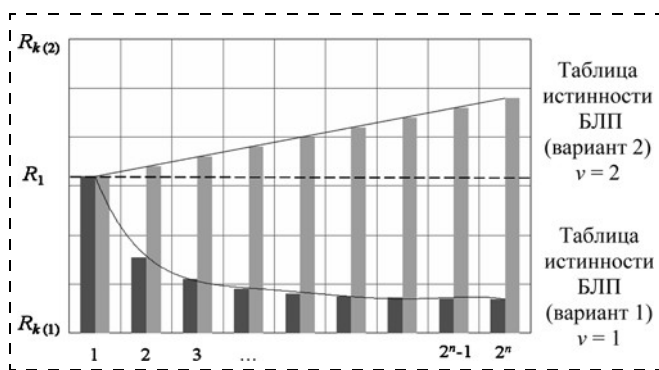


Рис. 3. Изменение сопротивления матрицы полезной нагрузки

в зависимости от номера подключаемого отвода ключевого элемента.

В общем случае при произвольном числе позиций из k отводов и последовательности замыкания УКК $\{s_k\}$ выполняется преобразование к МПН с s -группами с последовательно-параллельным подключением групп элементов R_{1-s} и R_{2-s} , сопротивления которых находят по формулам (1) и (3).

БЛП целесообразно реализовать на основе программируемых логических интегральных схем, работа которых характеризуется табл. 1 и 2 функционирования БЛП. Управление выбором активируемой таблицы функционирования БЛП происходит по значению сигнала v . Замыкание соответствующих ключей МПН определяется значением n .

Для отслеживания состояния параметров нагрузки дополнительной части ДЭМ с ДУ в БУН использован измеритель тока (ИТ), осуществляющий измерение силы тока в нагрузочной цепи. ИТ представляет собой шунтирующий резистор значительно меньшего номинала, чем сопротивление МПН, и операционный усилитель, осуществляющий преобразование протекающего по нему тока в значение напряжения. МК, установленный в БУН, осуществляет аналого-цифровое преобразование напряжения с ИТ и формирует соответствующий ему двоичный код. Для передачи полученного значения в ТСУ предусмотрен интерфейс связи БУН.

Полученные результаты

Микропроцессорная система БУН обеспечивает изменение нагрузки R_H МПН дополнительной части ДЭМ с ДУ для устранения рассогласования текущей и заданной частот вращения электропривода. Особенностью предлагаемой системы является отсутствие датчиков, отслеживающих механические параметры движения рабочего органа технологической машины. Для реализации обратной связи в состав БУН входит ИТ, который осуществляет отслеживание текущего значения тока в цепи нагрузки дополнительной части и его передачу по интерфейсу связи в ТСУ для восстановления параметров электропривода на основе ДЭМ с ДУ и обеспечения контроля его функционирования.

Таким образом, осуществляется регулирование частоты вращения выходного вала в широком диапазоне с обеспечением номинальных энергетических характеристик работы основной части во всем диапазоне регулирования. При этом мощность, потребленная ДЭМ с ДУ, распределяется на две составляющие: механическую, передаваемую на нагрузку, и электрическую, потребляемую электрической нагрузкой МПН.

Список литературы

1. Cirstea M. N., Dinu A., Khor J. G., McCormick M. Neural and Fuzzy Logic Control of Drives and Power Systems. Oxford, UK: Newnes, 2002. 408 p.

2. Соколовский Г. Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. М.: Академия, 2007. 264 с.
3. Карлов Б. Н., Есин Е. В. Современные преобразователи частоты: методы управления и аппаратная реализация // Силовая электроника. 2004. № 1. С. 50—54.
4. Терехов В. М., Осипов О. И. Системы управления электроприводов: учеб. для студентов вузов. М.: Академия, 2006. 299 с.
5. Степанов В., Матисон В., Виноградов А. Новые средства энергосбережения и оптимизации энергопотребления // Силовая электроника. 2005. № 3. С. 30—33.
6. Barnes M. Practical Variable Speed Drives and Power Electronics: Practical Professional Books. Newnes, 2003. 304 p.
7. Trzynadlowski A. M. Control of induction motors. Academic Press, 2000. 228 p.
8. Шрейнер Р. Т., Дмитренко Ю. А. Оптимальное частотное управление асинхронными электроприводами / Под ред. Г. В. Чалый. Кишинев: Штиинца, 1982. 224 с.
9. Народицкий А. Г. Современное и перспективное алгоритмическое обеспечение частотно-регулируемых электроприводов. СПб: Санкт-Петербургская Электротехническая Компания, 2004. 127 с.
10. Рудаков В. В., Столяров И. М., Дартау В. А. Асинхронные электроприводы с векторным управлением. Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1987. 134 с.
11. Chang J. H., Kim B. K. Minimum-time minimum-loss speed control of induction motors under field-oriented control // IEEE transactions on industrial electronics. 1997. N. 6. V. 44. P. 809—815.
12. Quang N. Ph., Dittrich J.-A. Vector Control of Three-Phase AC Machines: System Development in the Practice (Power Systems). Springer, 2010. 340 p.
13. Vas P. Sensorless Vector and Direct Torque Control: Monographs in Electrical and Electronic Engineering. USA: Oxford University Press, 1998. 768 p.
14. Патент 2400006 Российская Федерация, МПК7 H 02K 16/02 Электрическая машина / А. Б. Савиных, Т. С. Буканова; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО Марийский государственный технический университет. № 2009104680/28; заявл. 11.02.2009; опубл. 20.09.2010, Бюл. № 26. 8 с.
15. Буканова Т. С. Способ управления и модель электрической машины с дифференциальным торможением // Мехатроника, автоматизация и управление. 2011. № 12. С. 21—27.
16. Буканова Т. С., Савиных А. Б., Алиев М. Т. Алгоритм управления электропривода с дифференциальным торможением // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 5. Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. С. 120—129.

T. S. Bukanova, Senior lecturer, BukanovaTS@volgatech.net, **M. T. Aliev**, Associate professor, Volga State University of Technology

Microprocessor Motor Drive System Based on Two Rotor Electric Machine with a Differential Control

The paper presents the structure of the drive managed on the basis of two-rotor electric machine with differential control. We consider the practical implementation of the principle of operation and performance of the microprocessor control unit for controlling the load speed by double electric machine with two rotors differentially interrelated.

Keywords: microprocessor system, electric machine, electric drive, double-rotor electric machine

References

1. Cirstea M. N., Dinu A., Khor J. G., McCormick M. Neural and Fuzzy Logic Control of Drives and Power Systems. Oxford, UK: Newnes, 2002. 408 p.
2. Sokolovskiy G. G. Elektroprivody peremennogo toka s chastotnym regulirovaniem. M.: Akademiya, 2007. 264 p.
3. Karlov B. N., Esin E. V. Sovremennye preobrazovateli chastoty: metody upravleniya i apparatnaya realizatsiya. *Silovaya elektronika*. 2004. N. 1. P. 50—54.
4. Terekhov V. M., Osipov O. I. Sistemy upravleniya elektroprivodov: ucheb. dlya studentov vuzov. M.: Akademiya, 2006. 299 p.
5. Stepanov V., Matison V., Vinogradov A. Novye sredstva energosberezheniya i optimizatsii energopotrebleniya. *Silovaya elektronika*. 2005. N. 3. P. 30—33.
6. Barnes M. Practical Variable Speed Drives and Power Electronics: Practical Professional Books. Newnes, 2003. 304 p.
7. Trzynadlowski A. M. Control of induction motors. Academic Press, 2000. 228 p.
8. Shreyner R. T., Dmitrenko Yu. A. Optimal'noe chastotnoe upravlenie asinkhronnymi elektroprivodami. Pod red. G. V. Chalyu. Kishinev: Shtiintsa, 1982. 224 p.
9. Naroditskiy A. G. Sovremennoe i perspektivnoe algoriticheskoe obespechenie chastotno-reguliruemyykh elektroprivodov. Spb: Sankt-Peterburgskaya Elektrotekhnicheskaya Kompaniya, 2004. 127 p.
10. Rudakov V. V., Stolyarov I. M., Dartau V. A. Asinkhronnye elektroprivody s vektornym upravleniem. L.: Energoatomizdat, Leningr. otd-nie, 1987. 134 p.
11. Chang J. H., Kim B. K. Minimum-time minimum-loss speed control of induction motors under field-oriented control. *IEEE transactions on industrial electronics*. 1997. N. 6. V. 44. P. 809—815.
12. Quang N. Ph., Dittrich J.-A. Vector Control of Three-Phase AC Machines: System Development in the Practice (Power Systems). Springer, 2010. 340 p.
13. Vas P. Sensorless Vector and Direct Torque Control: Monographs in Electrical and Electronic Engineering. USA: Oxford University Press, 1998. 768 p.
14. Патент 2400006 Rossiyskaya Federatsiya, МПК7 H 02K 16/02 Elektricheskaya mashina. A. B. Savinykh, T. S. Bukanova; yayavitel' i patentoobladatel' GOU VPO Mariyskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet. № 2009104680/28; yayavl. 11.02.2009; opubl. 20.09.2010, Byul. № 26. 8 p.
15. Bukanova T. S. Sposob upravleniya i model' elektricheskoy mashiny s differentsial'nym tormozheniem. *Mekhatronika, avtomatizatsiya i upravlenie*. 2011. N. 12. P. 21—27.
16. Bukanova T. S., Savinykh A. B., Aliev M. T. Algoritm upravleniya elektroprivoda s differentsial'nym tormozheniem. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki*. Iss. 5. Tula: Izd-vo TulGU, 2012. P. 120—129.