

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

М. Т. Алиев, канд. техн. наук, доц., AlievMT@volgatech.net,

Поволжский государственный технологический университет, г. Йошкар-Ола

Экспериментальное исследование электропривода на основе двухроторной электрической машины с дифференциальным управлением

Статья посвящена развитию теоретических представлений элементов и систем управления. Практическая реализация современных систем автоматического управления на базе единых модулей требует использования альтернативных конструкций функционирования механических узлов, в частности в двухроторном исполнении. Это позволит реализовать адаптивное поведение машины в технологическом процессе, перемещение рабочих органов по сложным контурам с различной скоростью, высокой надежностью и безопасностью. Совокупность математического и экспериментального исследования является одним из перспективных и наиболее распространенных методов изучения объектов исследования, позволяет изучить его функционирование, научиться эффективно управлять объектом.

Целью работы является экспериментальное исследование электропривода двухроторной электрической машины с дифференциальным управлением путем натурного эксперимента и получение его переходных характеристик.

Для проведения натурного эксперимента разработана и изготовлена экспериментальная установка электропривода на основе двухроторной электрической машины с дифференциальным управлением, которая содержит механическую нагрузку, управляемую электрическую нагрузку, блок управления электрической нагрузкой, терминальную компьютерную управляющую систему. Экспериментальное исследование электропривода заключалось в регистрации частот вращения роторов двухроторной электрической машины с дифференциальным управлением в различных режимах работы при изменении входных нагрузок: механической и электрической. В ходе проведения эксперимента получены данные, отражающие переходные процессы электропривода по частотам вращения роторов, а также суммарную частоту вращения роторов. Проведена статистическая обработка данных полученных результатов и последующий сравнительный анализ результатов полученных ранее имитационных экспериментов и натурных данных установившихся значений частот вращения роторов в различных режимах работы электропривода.

Анализ представленных данных моделирования показывает качественное и количественное (в пределах 10 %) соответствие имитационного эксперимента натурному. Это означает, что разработанная математическая модель двухроторной электрической машины с дифференциальным управлением адекватна, отражает реальные физические процессы, протекающие в разработанной электрической машине и позволяет исследовать параметры и получить характеристики электропривода на ее основе в различных режимах работы.

Ключевые слова: дифференциальное управление, электропривод, двухроторная электрическая машина, экспериментальное исследование

Введение

В настоящее время сложные технологические процессы во многих отраслях промышленности сопровождаются интенсивной эксплуатацией механических узлов. Тенденцией развития современного машиностроения является внедрение в технологический процесс производства мехатронных технологических машин и роботов.

Основным направлением технического перевооружения промышленности является внедрение современных систем автоматического управления на базе единых модулей, объединяющих собственно электромеханические компоненты, которые управляются микроконтроллерами, персональными компьютерами или другими вычислительными средствами [1, 2]. Практическая реализация указанных взаимосвязей требует использования альтернативных

конструкций функционирования механических узлов, в частности, в двухроторном исполнении, применение которых в технологическом процессе позволит реализовать адаптивное поведение машины, перемещение рабочих органов по сложным контурам с различной скоростью, высокой надежностью и безопасностью.

Для оценки свойств электропривода необходимо получить его основные характеристики. Совокупность математического и экспериментального исследования является одним из перспективных и наиболее распространенных методов изучения объектов исследования, позволяет изучить его функционирование, научиться эффективно управлять объектом путем апробирования различных вариантов управления, прогнозирования состояния объекта под действием внешних дестабилизирующих факторов [3–6].

Целью работы является экспериментальное исследование электропривода двухроторной

электрической машины с дифференциальным управлением путем натурного эксперимента и получение его переходных характеристик.

**Электропривод на основе
двухроторной электрической машины
с дифференциальным управлением**

Для проведения натурного эксперимента разработана и изготовлена экспериментальная установка электропривода (ЭП) [7] на основе двухроторной электрической машины (ДЭМ) с дифференциальным управлением (ДУ), которая используется для систем кондиционирования и вентиляции воздуха [8], функциональная схема которой представлена на рис. 1. Механической нагрузкой ДЭМ с ДУ предла-

гаемого ЭП является крыльчатка с постоянным наклоном лопастей, поэтому управление объемом (скоростью) перекачиваемого воздуха осуществляется изменением частоты вращения внутреннего ротора.

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 ЭП и предназначен для приведения в действие рабочего органа технологической машины с заданной частотой вращения, что, в свою очередь, приводит к вращению промежуточного ротора.

Промежуточный ротор ДЭМ с ДУ соединен с блоком управления нагрузкой через управляемый выпрямитель напряжения, формирующий шину постоянного тока. Блок управле-

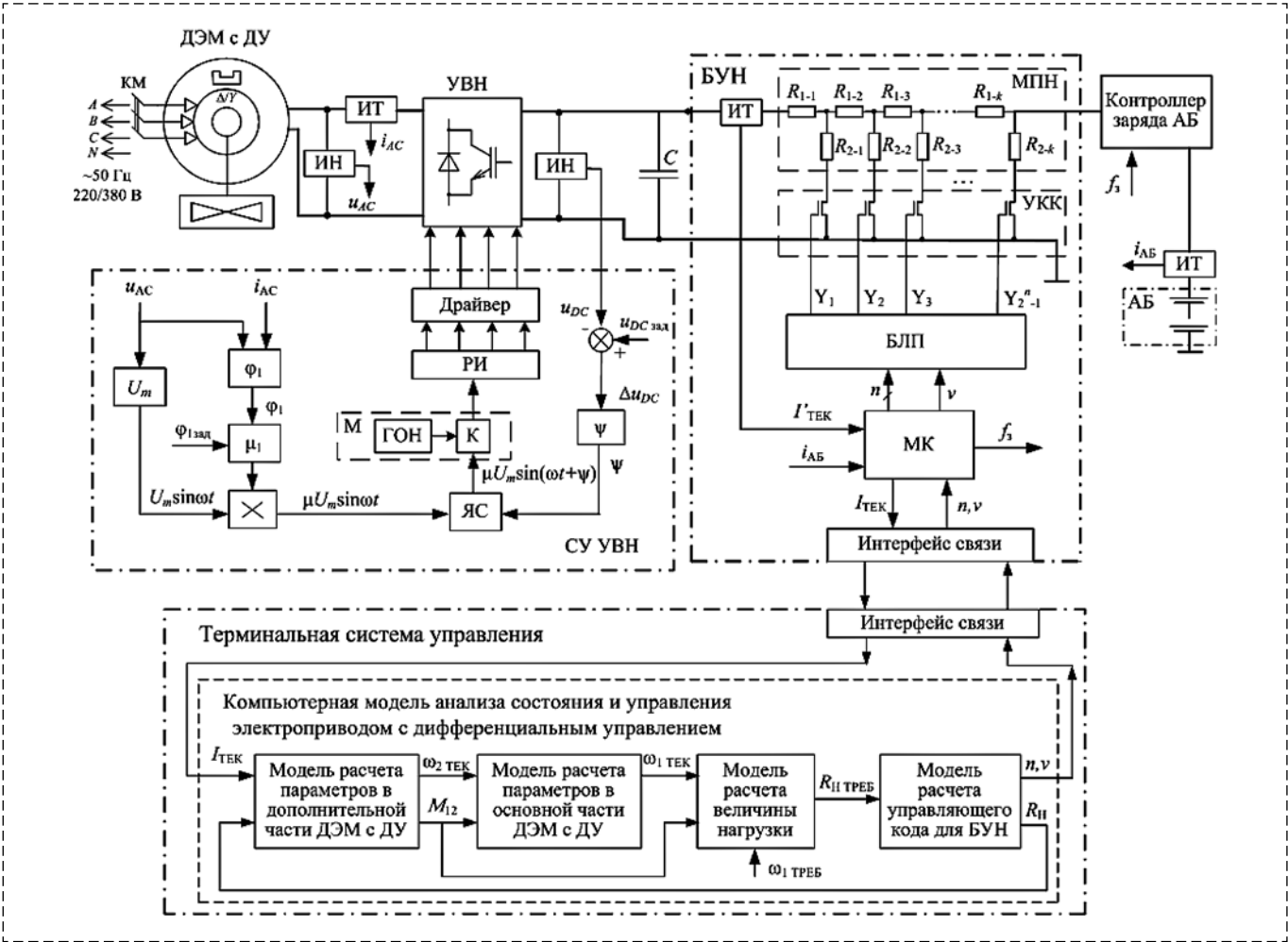


Рис. 1. Функциональная схема электропривода на основе двухроторной электрической машины с дифференциальным управлением: КМ — контактор; УВН — управляемый выпрямитель напряжения; СУ УВН — система управления управляемым выпрямителем напряжения; ИН — измеритель напряжения; ИТ — измеритель тока; МПН — матрица полезной нагрузки; УКК — управляемые коммутируемые ключи; БЛП — блок логического преобразования; БУН — блок управления нагрузкой; МК — микроконтроллер; АБ — аккумуляторная батарея; РИ — распределитель импульсов; К — компаратор; ГОН — генератор опорного напряжения; ЯС — ячейка сдвига; М — модулятор

ния нагрузкой содержит управляемую коммутируемую матрицу полезной нагрузки, которая включена в цепь обмотки дополнительной части. Управление нагрузкой происходит по сигналу n , определяющему число дополнительно подключаемых в качестве нагрузки элементов матрицы полезной нагрузки — сопротивление R_n . Матрица полезной нагрузки представляет собой электрическую цепь из повторяющихся элементарных нагрузок с двумя номиналами R_{1-k} и R_{2-k} . Каждый отвод нагрузки R_{2-k} соединен с общей шиной через управляемые коммутируемые ключи. Исходя из структуры блок управления нагрузкой реализует дискретное изменение сопротивления R_n в зависимости от управляющего сигнала с блока логического преобразования [1].

Терминальная система управления представляет собой компьютерную управляющую систему, которая на основе силы тока I , протекающего по нагрузке и обмотке дополнительной части, восстанавливает текущие параметры ДЭМ с ДУ. На основе анализа восстановленных параметров, в частности частоты вращения внутреннего ротора, и заданной требуемой частоты вращения происходит расчет требуемой нагрузки $R_{n, \text{треб}}$ в обмотке дополнительной части и формирование сигнала управления n . Процесс управления ЭП на основе ДЭМ с ДУ заключается в подстройке частоты вращения внутреннего ротора ЭП и сводится к управлению значением нагрузки R_n дополнительной части ДЭМ с ДУ [8].

Экспериментальное исследование электропривода на основе двухроторной электрической машины с дифференциальным управлением

При проведении эксперимента определяют следующие показатели, отображаемые на дисплее и регистрируемые на ЭВМ:

- частота вращения внутреннего ротора ДЭМ с ДУ, мин^{-1} ;
- частота вращения промежуточного ротора ДЭМ с ДУ, мин^{-1} ;
- суммарная частота вращения роторов, мин^{-1} .

В ходе проведения эксперимента были сняты основные параметры при следующих режимах работы:

- режим I предусматривает подачу прямоугольного сигнала на вход механической

нагрузки и отсутствие сигнала на входе дополнительной части. Данный режим предназначен для проверки работоспособности и правильности работы основной части ДЭМ с ДУ и получения номинальной частоты вращения устройства, используемой для последующей оценки правильности функционирования. Данный режим представляет собой разгон внутреннего ротора ДЭМ с ДУ с нагрузкой при жестко закреплённом промежуточном роторе, что соответствует режиму включения и работе основной двигательной части — *режим включения двигателя*;

- режим II определяется подачей сигнала электромагнитного момента вращения, выработанного основной частью, на промежуточный ротор. Данный режим предназначен для оценки правильности функционирования устройства, которая определяется распределением частот вращения между роторами ДЭМ с ДУ при действии на них сигнала выработанного электромагнитного момента. Данный режим представляет собой растормаживание промежуточного ротора устройства при работе основной части под нагрузкой — *режим расторможенных роторов*;
- режим III характеризуется подачей на вход электрической нагрузки сигнала прямоугольного импульса при работе устройства в режиме II. Данный режим предназначен для оценки влияния электрической нагрузки на частоту вращения внутреннего ротора и управляемости устройства. Для получения характеристик переходного процесса подключается минимально возможная электрическая нагрузка, обеспечивающая максимальный момент со стороны обмотки дополнительной части, препятствующий вращению промежуточного ротора;
- режим IV предусматривает изменение амплитуды сигнала на входе механической нагрузки при работе устройства в режиме II. Данный режим соответствует процессу изменения механической нагрузки на внутреннем роторе ДЭМ с ДУ в процессе функционирования.

Результаты эксперимента, представленные результатами измерений непрерывной величины, подвергались статистической обработке в соответствии с ГОСТ Р 50779.22—2005, который определяет расчет точечной оценки и доверительного интервала для среднего.

Для получения переходных процессов в ЭП на основе ДЭМ с ДУ используется ступенчатое изменение входного воздействия для двух внешних нагрузок: электрический и механический [9, 10].

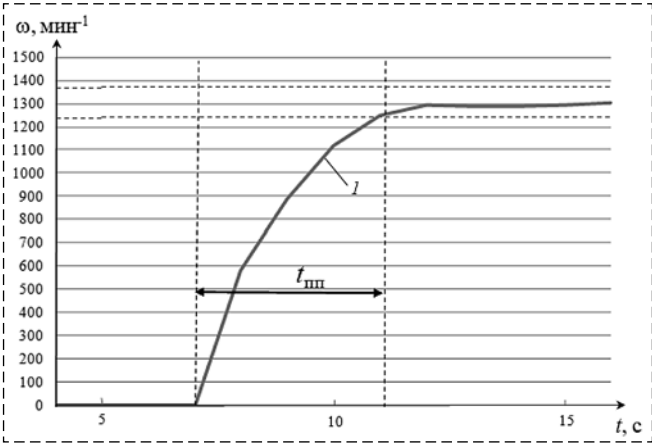


Рис. 2. Переходной процесс электропривода на основе двух-роторной электрической машины с дифференциальным управлением в режиме I для внутреннего ротора (I)

Таблица 1

Параметр	Среднее	Доверительный интервал
Частота вращения внутреннего ротора	1304	[1301,58; 1306,42]
Частота вращения промежуточного ротора	0	—

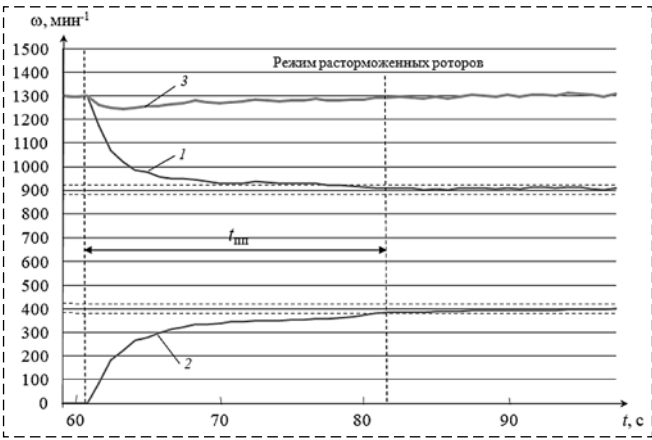


Рис. 3. Переходные процессы электропривода на основе электрической машины с дифференциальным управлением в режиме расторможенных роторов для внутреннего (1), промежуточного (2) роторов и суммарная частота вращения роторов (3)

Таблица 2

Параметр	Среднее	Доверительный интервал
Частота вращения внутреннего ротора	902	[900,18; 903,82]
Частота вращения промежуточного ротора	401	[399,04; 402,96]

Переходной процесс ($t_{пп}$) ЭП в режиме I представлен на рис. 2. Режим включения двигателя предусматривает разгон внутреннего ротора при жестко закрепленном промежуточном роторе, моделирующий разгон и работу обычного асинхронного двигателя, включенного в сеть.

Результаты статистической обработки данных оценки частоты вращения внутреннего ротора установившегося режима включения ЭП при доверительной вероятности $1 - \alpha = 0,95$ представлены в табл. 1.

Фрагмент экспериментальных данных, отражающий переходные процессы ЭП от момента растормаживания промежуточного ротора в режиме I до установившегося значения частот вращения роторов, а также суммарную частоту вращения роторов, представлен на рис. 3.

Время переходного процесса в режиме II расторможенных роторов $t_{пп} = 21,1$ с. Значительное увеличение времени переходного процесса для данного режима связано с разгоном промежуточного ротора ДЭМ с ДУ, обладающего значительным моментом инерции. Статистическое представление данных установившегося процесса режима расторможенных роторов по частотам вращения при доверительной вероятности $1 - \alpha = 0,95$ представлены в табл. 2.

Фрагмент экспериментальных данных, отражающий переходные процессы ЭП от момента подключения минимально возможной электрической нагрузки к дополнительной части в режиме расторможенных роторов до установившегося значения частот вращения роторов во времени, а также суммарную частоту вращения роторов, представлен на рис. 4.

Время переходного процесса для установления частот вращения при включении минимальной нагрузки составляет $t_{пп} = 6,7$ с. Статистическое представление данных установившегося процесса режима расторможенных роторов при включения минимальной электрической нагрузки с доверительной вероятностью $1 - \alpha = 0,95$ представлены в табл. 3.

Следующим объектом исследования является переход из режима расторможенных роторов ЭП на основе ДЭМ с ДУ при резком подключении дополнительной механической нагрузки, т. е. ситуация, когда после установления частот вращения в режиме расторможенных роторов на внутренний ротор резко увеличивается механическая нагрузка. Фрагмент экспериментальных данных, отражающий переходные процес-

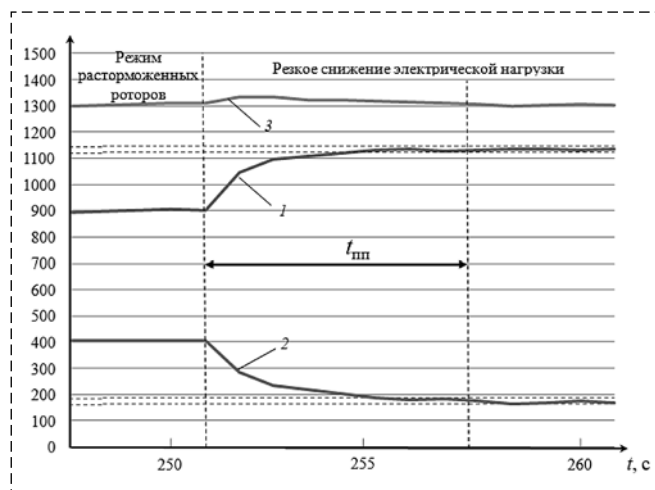


Рис. 4. Переходные процессы электропривода на основе двухроторной электрической машины с дифференциальным управлением в режиме расторможенных роторов при включении минимальной электрической нагрузки для внутреннего (1), промежуточного (2) роторов и суммарная частота вращения роторов (3)

Таблица 3

Параметр	Среднее	Доверительный интервал
Частота вращения внутреннего ротора	1135	[1132,92; 1137,08]
Частота вращения промежуточного ротора	173	[172,19; 173,81]

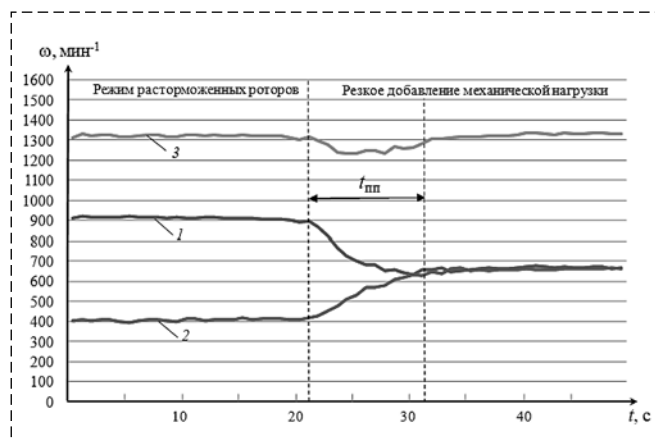


Рис. 5. Переходные процессы электропривода на основе двухроторной электрической машины с дифференциальным управлением в режиме расторможенных роторов при резком добавлении механической нагрузки для внутреннего (1), промежуточного (2) роторов и суммарная частота вращения роторов (3)

Таблица 4

Параметр	Среднее	Доверительный интервал
Частота вращения внутреннего ротора	665	[660,97; 669,03]
Частота вращения промежуточного ротора	663	[599,66; 666,34]

сы по частотам вращения, а также суммарную частоту вращения, представлен на рис. 5.

Время переходного процесса при условии резкого добавления механической нагрузки составляет соответственно $t_{пп} = 11,1$ с. Статистическое представление данных для установившихся процессов по частотам вращения при доверительной вероятности $1 - \alpha = 0,95$ представлено в табл. 4.

Для оценки адекватности математической модели было проведено сравнение данных натурного эксперимента с результатами имитационного моделирования по установившимся значениям частот вращения роторов ДЭМ с ДУ в представленных режимах работы [9]. По результатам сравнения отклонение модельных данных от экспериментальных в режиме включения двигателя составляет 3,3 % для внутреннего ротора; в режиме расторможенных роторов 7,7 % и 5,9 % для внутреннего и промежуточного роторов соответственно; при резком подключении минимально возможной нагрузки в режиме расторможенных роторов — 2,6 % и 8,1 %; при резком добавлении механической нагрузки в режиме расторможенных роторов — 6,6 % и 7,5 %. Кроме того, установившееся значение суммарной частоты вращения роторов не изменяется для всех режимов работы ЭП и соответствует номинальной частоте вращения двигательного устройства.

Заключение

Представленные результаты экспериментальных исследований позволили проверить соответствие имитационного эксперимента натурному и оценить адекватность разработанной математической модели. Проверка соответствия проводилась сравнением рассчитанных по модели и определенных в ходе эксперимента параметров экспериментальной установки для системы кондиционирования и вентиляции воздуха на основе ДЭМ с ДУ в различных режимах и условиях функционирования. Проведен расчет отклонений полученных значений натурного и имитационного эксперимента.

Анализ представленных данных имитационного и натурного моделирования показывает качественное и количественное (в пределах 10 %) соответствие имитационного эксперимента натурному. Значит, предложенная математическая модель ЭП на основе ДЭМ с ДУ

адекватна, отражает реальные физические процессы, протекающие в разработанной ДЭМ с ДУ, позволяет исследовать параметры и получать характеристики ДЭМ с ДУ в различных режимах работы. Разработанная схема ЭП на основе ДЭМ с ДУ работоспособна, позволяет функционировать в нескольких режимах.

Разработанная экспериментальная установка ЭП на основе ДЭМ с ДУ позволила провести исследование функционирования при управлении в диапазоне 0,87...0,7 номинальной частоты вращения

Список литературы

1. Колесников А. А. Синергетические методы управления сложными системами: теория системного синтеза. М.: КомКнига, 2005.
2. Nasar S. A. Schaum's Outline of Electric Machines & Electromechanics (Schaum's Outline series). McGraw-Hill. 2007.

3. Макаров В. Г. Анализ современного состояния теории и практики асинхронного электропривода // Вестник Казанского технологического университета. 2011. № 6. С. 109—120.
4. Самарский А. А., Михайлов А. П. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры. М.: Физматлит, 2002.
5. Krause P. C., Wasynczuk O., Sudhoff S. D. Analysis of Electric Machinery and Drive Systems. Wiley-IEEE Press. 2002.
6. Krishnan R. Electric Motor Drives: Modeling, Analysis, and Control. Prentice Hall. 2001.
7. Патент 2400006 Российская Федерация, МПК7 Н 02К 16/02 Электрическая машина / Савиных А. Б., Буканова Т. С.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО Марийский государственный технический университет. № 2009104680/28; заявл. 11.02.2009; опубл. 20.09.2010, Бюл. № 26. 8 с.
8. Буканова Т. С., Алиев М. Т. Микропроцессорная система электропривода на основе двухроторной электрической машины с дифференциальным управлением // Мехатроника, автоматизация, управление. 2015. № 2. С. 106—110.
9. Буканова Т. С. Способ управления и модель электрической машины с дифференциальным торможением // Мехатроника, автоматизация, управление. 2011. № 10. С. 21—27.
10. 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.

Pilot Study of the Electric Drive on the Basis of the Two-Rotor Electrical Machine with Differential Management

T. S. Bukanova, BukanovaTS@volgatech.net, M. T. Aliev, AlievMT@volgatech.net,
Volga State University of Technology Yoshkar-Ola

Corresponding author: **Bukanova Tatjana S.**, Ph. D., Associate Professor,
Volga State University of Technology Yoshkar-Ola, 424000, Russian Federation,
e-mail: BukanovaTS@volgatech.net

Accepted on May 13, 2018

Article is devoted to development of theoretical representations of elements and control systems. Implementation of the modern systems of automatic control on the basis of uniform modules demands use of the alternate designs of functioning of mechanical clusters, in particular in two-rotor execution. It will allow to realize adaptive behavior of the car in technological process, movement of actions on the composite contours with various speed, high reliability and safety. The set of mathematical and pilot study is one of perspective and most widespread methods of studying of objects of a research, allows to study its functioning, to learn to operate efficiently an object. The purpose of work is the pilot study of the electric drive of the two-rotor electrical machine with differential management by a natural experiment and receiving its surge characteristics. For carrying out a natural experiment the pilot unit of the electric drive on the basis of the two-rotor electrical machine with differential management which contains mechanical loading, the operated electric loading, the control unit of electric loading, the terminal computer operating system is developed and made. The pilot study of the electric drive consisted in filing of rotation frequencies of rotors of the two-rotor electrical machine with differential management in various duties at change of entrance loadings: mechanical and electric. During an experiment the data reflecting transition phenomena of the electric drive on rotation frequencies of rotors and also a cooperative rotation frequency of rotors are obtained. Statistical data processing of the received results and the subsequent comparative analysis of results of the received earlier imitating experiments and the natural these established values of rotation frequencies of rotors in various duties of the electric drive is carried out. The analysis of the submitted data of model operation shows qualitative and the quantitative (within 10 %) compliance of an imitating experiment to natural. Means, the developed mathematical model of the two-rotor electrical machine with differential management is adequate, reflects the actual physical processes proceeding in the developed electrical machine and allows to investigate parameters and to receive characteristics of the electric drive on its basis in various duties.

Keywords: differential management, electric drive, two-rotor electrical machine, pilot study

For citation:

Bukanova T. S., Aliev M. T. Pilot Study of the Electric Drive On The Basis Of The Two-Rotor Electrical Machine with Differential Management, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2018, vol. 19, no. 9, pp. 618—624.

DOI: 10.17587/mau.19.618-624

References

1. Kolesnikov A. A. *Sinergeticheskie metody upravleniya slozhnymi sistemami: teoriya sistemnogo sinteza* (Synergy methods of management of difficult systems: theory of system synthesis), Moscow, KomKniga, 2005 (in Russian).

2. **Nasar S. A.** Schaum's Outline of Electric Machines & Electromechanics (Schaum's Outline series), McGraw-Hill, 2007.
3. **Makarov V. G.** *Analiz sovremennogo sostojanija teorii i praktiki asinhronnogo jelektroprivoda* (Analysis of the current state of the theory and practice of the asynchronous electric drive), *Vestnik Kazanskogo tehnologicheskogo universiteta*, 2011, no. 6, pp. 109—120 (in Russian).
4. **Samarskij A. A., Mihajlov A. P.** *Matematicheskoe modelirovanie: Idei. Metody. Primery* (Mathematical simulation: Ideas. Methods. Examples), Moscow, Fizmatlit, 2002 (in Russian).
5. **Krause P. C., Wasynczuk O., Sudhoff S. D.** Analysis of Electric Machinery and Drive Systems, Wiley-IEEE Press, 2002.
6. **Krishnan R.** Electric Motor Drives: Modeling, Analysis, and Control, Prentice Hall, 2001.
7. **Patent** 2400006 Rossijskaja Federacija, MPK7 H 02K 16/02 *Jelektricheskaja mashina* (Electrical machine) / Savinyh A. B., Bukanova T. S.; заявитель i patentoobladatel' GOU VPO Marijskij gosudarstvennyj tehničeskij universitet. № 2009104680/28; заявл. 11.02.2009; opubl. 20.09.2010, Bjul. № 26. 8 s. (in Russian).
8. **Bukanova T. S., Aliev M. T.** *Mikropocessornaja sistema jelektpoprivoda na osnove dvuhpotopnoj jelektpicheskij mashiny s differencial'nym upravleniem* (Microprocessor system of the electric drive on a basis dvukhrotornoy the electric car with differential management), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 2, pp. 106—110 (in Russian).
9. **Bukanova T. S.** *Sposob upravlenija i model' jelektricheskij mashiny s differencial'nym tormozheniem* (Sposob of management and model of the electrical machine with differential braking), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2011, no. 10, pp. 21—27 (in Russian).
10. **Bukanova T. S., Savinyh A. B., Aliev M. T.** *Algoritm upravlenija jelektpoprivoda s differencial'nym tormozheniem* (The control algorithm of the electric drive with differential braking), *Izvestija TulGU. Tehničeskie nauki*, Tula, Publishing house of TulGU, 2012, vol. 5, pp. 120—129 (in Russian).

Издательство «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Телефон редакции журнала: **(499) 269-5510, (499) 269-5397**

Технический редактор *Е. В. Конова*. Корректор *Е. В. Комиссарова*.

Сдано в набор 26.06.2018. Подписано в печать 08.08.2018. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 8,86. Заказ МН918. Цена договорная.

Журнал зарегистрирован в Комитете Российской Федерации по делам печати,
телерадиовещания и средств массовых коммуникаций

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-11648 от 21.01.02

Учредитель: Издательство "Новые технологии"

Оригинал-макет ООО "Авансес солюшнз". Отпечатано в ООО "Авансес солюшнз".
119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1.