

УДК 621.3.07

А.А. Терехин, Д.А. ДаденковПермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия**ОБЗОР СПОСОБОВ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ
АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА**

Представлены обзор и анализ основных методов определения параметров асинхронной машины. Рассмотрена проблема нехватки и неточности информации о параметрах схемы замещения асинхронного двигателя. Выделены основные параметры, используемые при синтезе регуляторов тока и скорости в системе векторного управления. Выполнены классификация и анализ различных методов идентификации, при этом выделены две основные группы методов, в которых оценка параметров осуществляется в режиме реального времени и при выполнении предварительной наладки электропривода, до ввода его в эксплуатацию. В результате сравнения выявлены основные достоинства и недостатки способов идентификации. Отмечено что методы на основе обработки доступных для измерения фазных токов и напряжений являются наиболее распространенными. При этом для определения параметров в большинстве методов идентификации используется математическая модель асинхронной машины. Для оценки параметров в режиме реального времени наиболее перспективным являются различные модификации фильтра Калмана и метода наименьших квадратов. При предварительной настройке электропривода обычно используют активные методы, для реализации которых в силовую цепь электропривода вводят тестовый информационный сигнал. Предложен вариант построения структуры систем данного класса. В заключение отмечено, что вопросы оценки и идентификации параметров асинхронной машины являются актуальными и требуют детального изучения с разработкой новых алгоритмов и подходов. В ходе дальнейших работ планируется разработать и исследовать систему предварительной идентификации параметров асинхронной машины с использованием экспериментальной лабораторной установки электропривода переменного тока.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, параметры схемы замещения, математическая модель, параметрическая идентификация, адаптивные системы, системы векторного управления.

A.A. Terekhin, D.A. Dadenkov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**REVIEW OF IDENTIFICATION METHODS
OF INDUCTION MOTOR PARAMETERS**

This article provides an overview and analysis of the main methods of parametric identification of the induction motor. The problem of shortage and inaccuracy of information on actual parameters of the equivalent circuit of induction motor is v. Main parameters, which are necessary to take into account the implementation of vector control systems are selected. Classification and analysis of different identification methods are implemented. Identification methods to be implemented in real-time and pre-

adaptation mode, the drive, before putting it into operation are compared. The main advantages and disadvantages of identification methods are marked. Methods based on the processing available for measurement of phase currents and voltages are the most common. A mathematical model of an asynchronous machine is used to determine the parameters in most identification methods. Various modifications of the Kalman filter and the least squares method are the most promising to estimate the parameters in real time. In the pre-setting of the actuator usually are used active methods by inserting into the power circuit of the electric drive a test information signal. A variant of constructing the structure of systems of this class is proposed. In conclusion, it is noted that the assessment and identification of induction motor parameters are relevant and need detailed study with the development of new algorithms and approaches. In the course of further work, it is planned to develop and study a system of preliminary identification of the parameters of an induction motor using an experimental laboratory installation of an AC drive.

Keywords: induction motor, induction motor parameters, mathematical model, parametric identification, adaptive system, vector control system.

Введение. На сегодняшний день самым распространенным в промышленности типом электропривода является привод переменного тока на базе асинхронного двигателя (АД). К достоинствам АД можно отнести простоту изготовления, относительно низкую стоимость и надежность в эксплуатации. Стремление производителей к созданию высококачественного асинхронного электропривода без использования информационных датчиков, монтируемых на валу или встраиваемых непосредственно в двигатель, привело к распространению бездатчиковых систем электропривода с векторным управлением.

Для реализации векторного управления необходимо очень точное знание активного и реактивного сопротивления статора и ротора, а также параметров намагничивающей цепи [1, 2]. Большинство из таких параметров схемы замещения АД (рис. 1) не приводится в справочниках или же не обладает достоверной точностью [3].

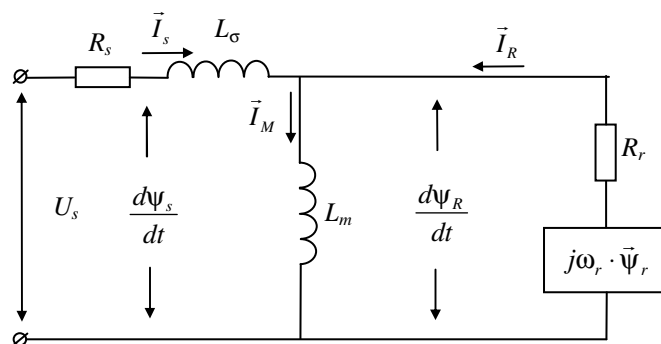


Рис. 1. Г-образная схема замещения асинхронной машины

Кроме этого при работе электропривода имеется температурный дрейф активных сопротивлений статорных и роторных обмоток двигателя. Например, активные сопротивления двигателя во время работы

могут увеличиваться на 50 % относительно своей величины в «холодном» состоянии [3, 4]. Параметрическая идентификация схемы замещения является одним из способов решения данной проблемы. Актуальность задачи поиска и реализации новых путей идентификации параметров АД обусловлена закрытостью алгоритмов работы и идентификационных моделей, применяемых в серийных преобразователях частоты, изготавливаемых зарубежными производителями.

1. Параметры асинхронного двигателя. Основными параметрами, которые необходимо знать для синтеза регуляторов и настройки системы векторного управления, являются сопротивления и индуктивности обмоток статора (R_s и L_s), ротора (R_r и L_r), индуктивность цепи намагничивания L_m и момент инерции J , при этом не все эти параметры могут быть получены из паспортных данных, справочной литературы или каталогов.

Обычно известными при проектировании электропривода являются параметры номинального режима работы электродвигателя [3]:

- линейное или фазное напряжение питания U_n , В;
- линейный или фазный ток I_n , А;
- механическая мощность P_n , Вт;
- коэффициент полезного действия η_n ;
- скорость вращения n_n , об/мин, (скольжение S_n);
- коэффициент мощности $\cos\varphi$;
- перегрузочная способность по моменту, о.е.

Для определения параметров схемы замещения АД (см. рис. 1) в большинстве методов идентификации используется математическая модель АД, которую с учетом общеизвестных допущений можно записать в виде [2, 4]:

$$\begin{cases} u_s(t) = R_s \cdot i_s(t) + L_s \cdot \frac{di_s(t)}{dt} + L_m \cdot \frac{di_r(t)}{dt}, \\ 0 = R_r \cdot i_r(t) + L_m \cdot \frac{di_s(t)}{dt} + L_r \cdot \frac{di_r(t)}{dt} - j\omega(t)L_m i_s(t) - j\omega(t)L_r i_r(t), \\ J \cdot \frac{d\omega(t)}{dt} \cdot \frac{1}{p_\tau} = \frac{3}{2} \cdot p_\tau \cdot L_m \cdot I_m (i_s(t) \cdot i_r(t)) - M_c, \end{cases} \quad (1)$$

где $u_s(t)$ – напряжение на обмотках статора; $i_s(t)$, $i_r(t)$ – токи статора и ротора; R_s , R_r – сопротивления обмоток статора и ротора, L_s , L_r , – индуктивности обмоток статора и ротора, L_m – индуктивность

намагничивания, p_τ – число пар полюсов, $M_c(t)$ – момент сопротивления, J – момент инерции.

Как видно из системы уравнений (1), все необходимые для идентификации параметры представлены в данной модели. Заметим, что обычно для режима идентификации на интервалах коммутации скорость вращения вала будет изменяться незначительно ($\omega = \text{const}$), и поэтому третье уравнение системы (1) может быть исключено из рассмотрения [4].

2. Методы идентификации параметров асинхронного двигателя. Все многообразие методов параметрической идентификации можно разделить на методы, реализуемые в режиме реального времени [5, 6] и реализуемые в режиме адаптации электропривода, при первом запуске привода в эксплуатацию [7, 8] (рис. 2).

При этом методы, основанные на обработке и регистрировании доступной информации о двигателе, такой как фазные токи и напряжения, являются наиболее распространенными.



Рис. 2. Классификация способов идентификации параметров АД

Определение параметров асинхронного двигателя в режиме реального времени в установившемся режиме рассмотрено в работах [5, 6, 9]. В работе [5] представлена методика использования расширенного фильтра Калмана для определения потокосцепления и активного сопротивления ротора. Использование фильтра Калмана является довольно распространенным способом решения задач параметрической идентификации. При этом в статье [5] доказывается невозможность одновременной оценки активного сопротивления ротора и бездатчиковой оценки скорости при установившемся режиме работы АД в режиме реального времени. Полученное в результате предварительной оценки потокосцепление и активное сопротивление можно использовать для расчета параметров регуляторов в системах векторного управления. Основным недостатком методов идентификации на основе фильтра Калмана заключается в том, что они могут быть использованы только для линейных систем. Однако в математической модели АД присутствуют перекрестные обратные связи, поэтому для линеаризации модели и решения уравнений в пространстве состояний требуется пренебречь некоторыми связями и тем самым уменьшить точность определения параметров схемы замещения.

В установившихся режимах при постоянной частоте вращения ротора система уравнений может быть упрощена и задачи идентификации электрических и механических параметров могут быть разделены. В работе [7] представлена раздельная идентификация электрических и механических параметров. Для определения электрических параметров в этой работе использован метод наименьших квадратов, ещё один из методов, часто используемый при идентификации параметров АД. Данный метод основан на оценке неизвестных величин по результатам измерений, содержащим случайные ошибки. При этом задача метода состоит в выборе такого вектора, при котором сумма квадратов отклонений измерений от этого вектора будет минимальной. Простота, несложная реализация на микропроцессорной технике и наглядность в наладке делают данный класс методов идентификации довольно перспективным. При этом получаемые оценки являются достаточно точными и устойчивыми к внешним возмущениям, действующим на объект наблюдения.

Одной из модификаций рассмотренных выше способов идентификации является рекуррентный метод наименьших квадратов,

который оценивает параметры с минимизацией ошибки по средне-квадратичному критерию. Из недостатков метода можно отметить высокие требования к точному описанию модели алгебраическими уравнениями. Достоинством же метода можно считать отсутствие требований к точности и полноте исходной информации. Рекуррентный метод рассмотрен в статье [9], где показано определение активного сопротивления статора, эквивалентной индуктивности рассеяния и постоянной времени роторной цепи АД.

Другим классом методов идентификации являются так называемые активные методы, для реализации которых в силовую цепь привода вводят дополнительный тестовый информационный сигнал [10]. Использование методов с применением тестового идентифицирующего сигнала в режиме эксплуатации электродвигателя в условиях реального технологического процесса обычно является недопустимым. Поэтому обычно эти методы используют при предварительной настройке электропривода до ввода его в эксплуатацию, при этом на двигатель с помощью системы векторного управления [11–13] подается специально сформированный вектор напряжения с малой амплитудой и нулевой частотой вращения. По измеренному току статора вычисляется сопротивление. Предлагаемая структура системы идентификации для данного класса методов представлена на рис. 3.

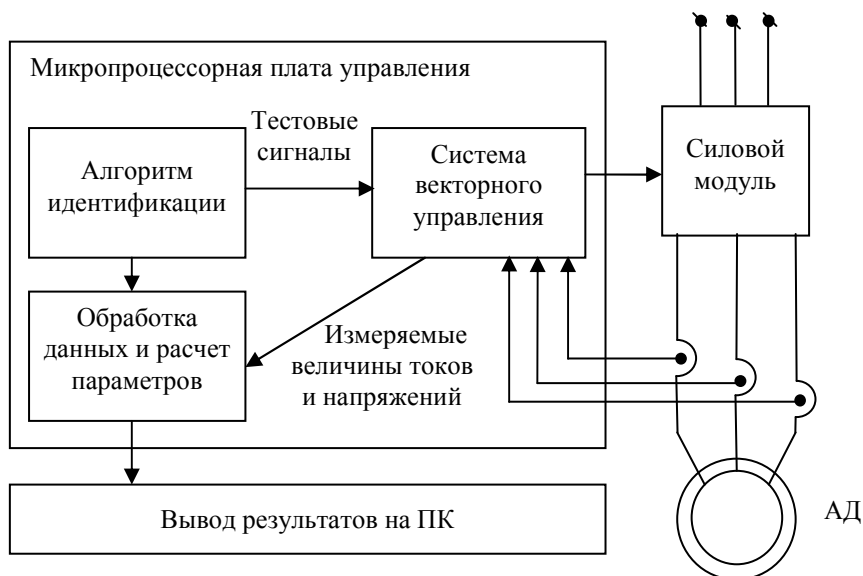


Рис. 3. Структура системы активной идентификации

Недостатками метода является возникающая несимметрия питающего напряжения, а также произвольные потери мощности на измерительной цепи.

Рассмотрим также группу методов идентификации на основе теории адаптивных систем. Адаптивные системы способны изменять параметры или структуру регулятора при изменении параметров объекта управления или возмущений, действующих на объект. Они применяются в тех случаях, когда другие принципы управления становятся недостаточно точными. Согласно этому методу выполняется адаптивная идентификация неизвестных параметров асинхронного привода с помощью его математической модели [14]. Используемые в адаптивных системах математические модели являются довольно сложными, поэтому для их расчета необходимо накапливать информацию во время работы привода, что является непростой задачей. В работе [15] рассмотрена процедура адаптивной параметрической идентификации тяговых асинхронных электродвигателей в реальном времени для эффективного управления. Предложенный метод показал достаточно высокую точность оценки параметров АД.

Выводы. В заключение отметим, что вопросы оценки и идентификации параметров асинхронной машины являются актуальными на сегодняшний день и требуют дальнейшего изучения и разработки новых алгоритмов и способов с учетом развития современной микропроцессорной техники и программных средств. При этом поскольку реализация параметрической идентификации в режиме реального времени в системах векторного управления является сложной задачей и требует больших затрат ресурсов процессора и памяти, в дальнейших исследованиях планируется исследовать методы предварительной идентификацией параметров АД, используемые до ввода системы электропривода в эксплуатацию. При этом планируется разработать и промоделировать новые алгоритмы идентификации с использованием экспериментальной лабораторной установки электропривода переменного тока [16].

Библиографический список

1. Виноградов А.Б., Колодин И.Ю., Сибирцев А.Н. Адаптивно-векторная система управления бездатчикового асинхронного электропривода серии ЭПВ // Силовая электроника. – 2006. – № 3. – С. 47–51.

2. Даденков Д.А., Солодкий Е.М., Шачков А.М. Моделирование системы векторного управления асинхронным двигателем в пакете Matlab/Simulink // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2014. – № 3(11). – С. 117–128.

3. Усольцев А.А. Определение параметров схемы замещения асинхронного двигателя по справочным данным [Электронный ресурс]. – URL: http://ets.ifmo.ru/usolzev/wopros/op_ad.pdf (дата обращения: 03.11.2016).

4. Андреев М.А., Водовозов А.М. Идентификация параметров асинхронного электропривода по переходным процессам в силовой цепи // Научно-технические ведомости Санкт-Петербург. гос. политехн. ун-та. – 2010. – № 110. – С. 38–42.

5. Каширских В.Г., Завьялов В.М. Определение в реальном времени активного сопротивления и потокосцепления ротора асинхронного двигателя при его работе в установившемся режиме // Вестник Кузбасского гос. техн. ун-та. – 2003. – № 1. – С. 21–24.

6. Водовозов А.М., Елюков А.С. Идентификация параметров асинхронной машины в установившихся режимах // Вестник Иванов. гос. энергетич. ун-та. – 2003. – № 3. – С. 69–71.

7. Однолько Д.С. Алгоритм идентификации электромагнитных параметров асинхронной машины при работе от трехфазной электрической цепи // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика. – 2013. – № 1. – С. 47–55.

8. Однолько Д.С. Синтез и исследование алгоритма оценки активного статорного сопротивления асинхронного двигателя при неподвижном роторе // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика. – 2012. – № 2. – С. 33–39.

9. Чернышов К.Н. Сравнительный анализ методов online идентификации параметров асинхронного двигателя // Информационные системы и технологии: материалы III Междунар. науч.-техн. интернет-конф. – Орел, 2015.

10. Идентификация электрических параметров тяговых асинхронных двигателей электровозов / О.Н. Синчук, В.Ю. Захаров, И.О. Синчук, Л.В. Сменова // Электротехнические и компьютерные системы. – 2013. – № 10(86). – С. 50–59.

11. Маслов М.О., Панкратов В.В. Один алгоритм предварительной идентификации параметров для асинхронного электропривода с векторным управлением // Тр. XIII Междунар. конф. «Электроприводы переменного тока» (ЭППТ'05, 15–18 марта 2005 г., Екатеринбург, Россия). – Екатеринбург, 2005. – С. 99–102.

12. Даденков Д.А., Белоногов А. В., Варзаносов П.В. Бездатчиковое векторное управление с адаптивным наблюдателем скорости и непосредственной коррекцией электрического угла // *Фундаментальные исследования*. – 2016. – № 11(3). – С. 505–509.

13. Разработка и моделирование полеориентированной системы векторного управления асинхронным двигателем / Е.М. Солодкий, Д.А. Даденков, А.М. Шачков, К.В. Павловская // *Информационно-измерительные управляющие системы*. – 2016. – № 9. – С. 26–32.

14. Каширских В.Г., Нестеровский А.В. Этап подготовки к динамической идентификации асинхронных электродвигателей // *Вестник Кузбас. гос. техн. ун-та*. – 2006. – № 2. – С. 39–41.

15. Нгуен Куанг Тхиеу. Адаптивная идентификация параметров тяговых асинхронных электродвигателей в реальном масштабе времени [Электронный ресурс]. – URL: http://mami.ru/science/autotr2009/scientific/article/s03/s03_19.pdf (дата обращения: 10.11.2016).

16. Кычкин А.В., Даденков Д.А., Билалов А.Б. Автоматизированная информационная система полунатурного моделирования статической нагрузки электроприводов // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления*. – 2013. – № 8. – С. 73–83.

References

1. Vinogradov A.B., Kolodin I.Iu., Sibirtsev A.N. Adaptivno-vektornaia sistema upravleniia bezdatchikovogo asinkhronnogo elektroprivoda serii EPV [The adaptive – vector control system of sensorless induction motor EPV series]. *Silovaia elektronika*, 2006, no. 3, pp. 47-51.

2. Dadenkov D.A., Solodkii E.M., Shachkov A.M. Modelirovanie sistemy vektornogo upravleniia asinkhronnym dvigatelem v pakete MatLab/Simulink [Simulation of vector control system of induction motor in MatLab/Simulink package]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotekhnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2014, no. 3(11), pp. 117–128.

3. Usol'tsev A.A. Opredelenie parametrov skhemy zameshcheniia asinkhronnogo dvigatel'ia po spravochnym dannym [Defining the parameters of the equivalent circuit of the induction motor by reference data], available at: http://ets.ifmo.ru/usolzev/wopros/op_ad.pdf (accessed 03 November 2016).

4. Andreev M.A., Vodovozov A.M. Identifikatsiia parametrov asinkhronnogo elektroprivoda po perekhodnym protsessam v silovoi tsepi [Parameter identification of induction motor by transients in the power circuit]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta*, 2010, no. 110, pp. 38-42.

5. Kashirskikh V.G., Zav'ialov V.M. Opredelenie v real'nom vremeni aktivnogo soprotivleniia i potokostsepleniia rotora asinkhronnogo dvigatel'ia pri ego rabote v ustanovivshemsia rezhime [Determination of a real time active resistivity and the rotor flux of the induction motor when it is operating in a steady state]. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2003, no. 1, pp. 21-24.

6. Vodovozov A.M., Eliukov A.S. Identifikatsiia parametrov asinkhronnoi mashiny v ustanovivshikhsia rezhimakh [Identification parameters of the asynchronous machine in the steady state]. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*, 2003, no. 3, pp. 69-71.

7. Odnol'ko D.S. Algoritm identifikatsii elektromagnitnykh parametrov asinkhronnoi mashiny pri rabote ot trekhfaznoi elektricheskoi tsepi [Algorithm for identification of electromagnetic parameters of asynchronous machine when working on a three-phase electric circuit]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii i energeticheskikh ob"edinenii SNG. Energetika*, 2013, no. 1, pp. 47-55.

8. Odnol'ko D.S. Sintez i issledovanie algoritma otsenki aktivnogo statornogo soprotivleniia asinkhronnogo dvigatel'ia pri nepodvizhnom rotore [Synthesis and study of algorithm evaluation of the active stator resistance of the induction motor with a fixed rotor]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii i energeticheskikh ob"edinenii SNG. Energetika*, 2012, no. 2, pp. 33-39.

9. Chernyshov K.N. Sravnitel'nyi analiz metodov online identifikatsii parametrov asinkhronnogo dvigatel'ia [Comparative analysis of online parameters identification methods of induction motor]. *Materialy III Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi internet-konferentsii "Informatzionnye sistemy i tekhnologii"*. Orel, 2015.

10. Sinchuk O.N., Zakharov V.Iu., Sinchuk I.O., Smenova L.V. Identifikatsiia elektricheskikh parametrov tiagovykh asinkhronnykh dvigatelei elektrovozov [Identification electrical parameters of the traction asynchronous engines of electric locomotives]. *Elektrotekhnicheskie i komp'iuternye sistemy*, 2013, no. 10(86), pp. 50-59.

11. Maslov M.O., Pankratov V.V. Odin algoritm predvaritel'noi identifikatsii parametrov dlia asinkhronnogo elektroprivoda s vektornym upravleniem [One algorithm for preliminary parameter identification for an asynchronous electric drive with vector control]. *Trudy XIII Mezhdunarodnoi konferentsii "Elektroprivody peremennogo toka" (EPPT'05)*, 15–18 March 2005 goda, Ekaterinburg. Ekaterinburg, 2005, pp. 99-102.

12. Dadenkov D.A., Belonogov A.V., Varzanosov P.V. Bezdatchikovoie vektornoe upravlenie s adaptivnym nabludatelem skorosti i neposredstvennoi korrektsiei elektricheskogo ugla [Sensorless vector control with the adaptive speed observe and direct electrical angle correction]. *Fundamental'nye issledovaniia*, 2016, no. 11(3), pp. 505-509.

13. Solodkii E.M., Dadenkov D.A., Shachkov A.M., Pavlovskaiia K.V. Razrabotka i modelirovanie poleorientirovannoi sistemy vektornogo upravleniia asinkhronnym dvigatelem [Simulation of field-oriented control system of induction motor]. *Informatsionno-izmeritel'nye upravliaiushchie sistemy*, 2016, no. 9, pp. 26-32.

14. Kashirskikh V.G., Nesterovskii A.V. Etap podgotovki k dinamicheskoi identifikatsii asinkhronnykh elektrodvigatelei [Stage of preparation for the dynamic identification of asynchronous electric motors]. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2006, no. 2, pp. 39-41.

15. Nguen Kuang Tkhieu. Adaptivnaia identifikatsiia parametrov tiagovykh asinkhronnykh elektrodvigatelei v real'nom masshtabe vremeni [Adaptive parameter identification traction induction motors in real time], available at: http://mami.ru/science/autotr2009/scientific/article/s03/s03_19.pdf (accessed 10 November 2016).

16. Kychkin A.V., Dadenkov D.A., Bilalov A.B. Avtomatizirovannaia informatsionnaia sistema polunaturnogo modelirovaniia staticheskoi nagruzki elektroprivodov [Automated information system of the sessional modeling of static loading of electric drives]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2013, no. 8, pp. 73-83.

Сведения об авторах

Терёхин Андрей Александрович (Пермь, Россия) – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр-кт, 29, e-mail: rubin98765@gmail.com).

Даденков Дмитрий Александрович (Пермь, Россия) – старший преподаватель кафедры микропроцессорных средств автоматизации Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр-кт, 29, e-mail: dadencov@mail.msa.pstu.ru).

About the authors

Teryokhin Andrey Aleksandrovich (Perm, Russian Federation) is a Student Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: rubin98765@gmail.com).

Dadenkov Dmitry Aleksandrovich (Perm, Russian Federation) is a Senior Lecturer of Department on Automation Microprocessors Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: dadencov@mail.msa.pstu.ru).

Получено 28.04.2017