

УДК 629.4+62-83
DOI: 10.12737/18303

Д.В. Конохов, Г.А. Федяева, А.Н. Тарасов, Т.В. Смородова

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО ДВУХЗОННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ПРЯМЫМ УПРАВЛЕНИЕМ МОМЕНТОМ

Изложены принципы построения и моделирования системы энергоэффективного двухзонного регулирования скорости асинхронного электропривода с прямым управлением моментом, оптимизированной по критерию минимума тока статора и модернизированной для наиболее полного использования двигателя по мощности и нагреву. Приве-

дены методика и результаты моделирования динамических процессов в системе.

Ключевые слова: моделирование, асинхронный электропривод, система управления, энергоэффективность, потокосцепление статора, минимум тока статора, двухзонное регулирование, прямое управление моментом.

D.V. Konokhov, G.A. Fedyaeva, A.N. Tarasov, T.V. Smorudova

SIMULATION OF SYSTEM OF ENERGY EFFICIENT DOUBLE-AREA VELOCITY CONTROL IN ASYNCHRONOUS DRIVE WITH MOMENT DIRECT CONTROL

In the paper there are presented and tested energy-efficient algorithms of asynchronous drive control with the system of moment direct control on the basis of simulation. The algorithms are directed to the reduction of stator current consumption and also to the maximum use of an engine on heating and power. With purpose of energy saving the electric drive system with direct moment control is supplied additionally with a special setting device of a stator flux linkage where the dependence of a stator flux linkage upon the moment of an asynchronous drive necessary to support an optimum angle between moment-forming vectors is realized. A functional scheme of the system of an energy effective double-area control of an asynchronous drive

velocity with the direct control of a moment and an adjustable capacity limitation reflecting principles of functioning and an interrelation of system basic units is shown. To check-up the solutions offered there is developed a model of a traction electric drive system in the basic library of the bundled software Matlab Simulink, the results of its modeling confirm the effectiveness in the application of energy saving algorithms allowing the reduction of current consumption of the asynchronous traction electric drive by 7-10%.

Key words: simulation, asynchronous drive, management system, power effectiveness, stator flux linkage, minimum current of stator, double-area adjustment, direct control of moment.

Анализ использования электроприводов, выполненных по схеме «полупроводниковый преобразователь частоты - асинхронный двигатель», показывает, что как в традиционно используемых, так и во вновь разрабатываемых электроприводах существуют пока еще недоиспользованные резервы повышения энергетической эффективности электромеханического преобразования энергии. Наиболее полно возможности повышения эффективности электромеханического преобразования энергии можно обеспечить путем оптимизации режимов работы асинхронных двигателей (АД) при регулировании потока как в функции скорости, так и в функции электромагнитного момента (однако при этом следует сохранять электромеханиче-

ские статические и динамические характеристики электропривода, необходимые для решения основной технологической задачи) [1].

Первый способ управления АД, основанный на одновременном изменении амплитуды U_1 и частоты f_1 напряжения статора, получивший название скалярного управления, до сих пор является широко распространенным и находит свое применение в различных отраслях промышленности и транспорта. В системах скалярного управления при одновременном регулировании магнитного потока и частоты его вращения относительно ротора возможно выявление рационального (оптимального) режима управления по минимуму тока статора, минимуму электрической мощности

и др., который необходим для обеспечения ограничения нагрева двигателя и расширения области допустимых по нагреву моментов нагрузки [2].

Существуют также векторные системы управления, оптимизированные по различным критериям энергоэффективности, но они уступают по ряду показателей системам с прямым управлением моментом (DTC - direct torque control). Система DTC обладает высоким быстродействием, и в то же время в ней не требуются необходимые при реализации векторного управления преобразователи координат, регуляторы составляющих тока статора, блоки компенсации перекрестных связей АД, организация широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Кроме того, система более устойчива к возмущениям и неточности информации о переменных состояния объекта управления, чем векторная система. Однако для систем DTC пока недостаточно проработаны энергосберегающие алгоритмы управления двигателями, что не позволяет полностью реализовать все преимущества DTC.

В связи с этим предлагается вариант энергоэффективной системы регулирования асинхронного электропривода с прямым управлением моментом [3], оптимизированной по критерию минимума тока статора (рис. 1). Для того чтобы реализовать минимум потребления тока статора в системе DTC, целесообразно оптимизировать потокосцепление статора. Наиболее просто в первом приближении выполнить это по специальной зависимости потокосцепления статора АД от момента двигателя, заранее рассчитанной с учетом насыщения, исходя из условия поддержания оптимального угла между моментобразующими векторами тока и потокосцепления статора. Эта зависимость реализована в специальном задатчике потокосцепления, на выходе которого формируется задание на потокосцепление статора $\psi'_{s3} = f(M_3)$ (рис.1). Система с прямым управлением моментом, снабженная быстродействующим релейным регулятором потокосцепления статора [1], позволяет с высокой динамикой и качеством регулировать потокосцепление по требуемому энергосберегающему закону.

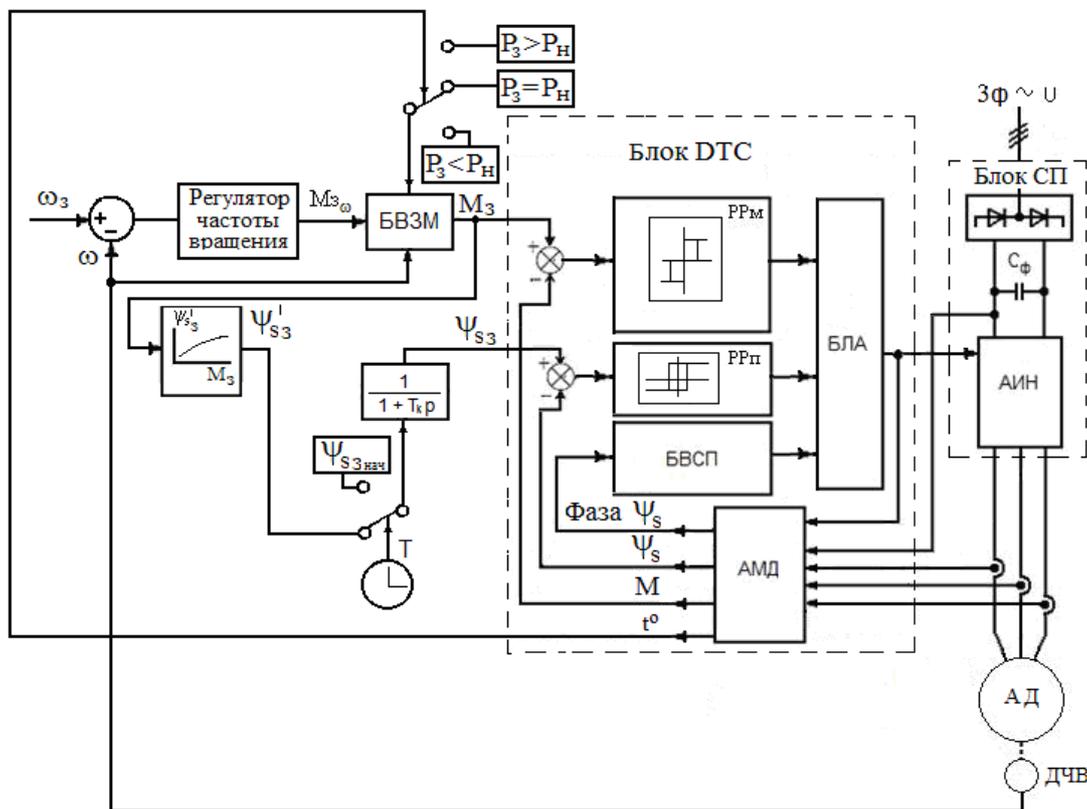


Рис. 1. Функциональная схема энергоэффективной системы электропривода с прямым управлением моментом

Система управления (рис. 1) состоит из следующих основных частей: блока задания потокосцепления, блока ДТС, а также автономного инвертора напряжения (АИН) и асинхронного двигателя (АД). Блок ДТС включает в себя два регулятора – релейный регулятор момента (РРМ) и релейный регулятор потокосцепления (РРП), блок вычисления сектора потокосцепления (БВСП), адаптивную модель двигателя (АМД) и блок логического автомата (БЛА), который выдаёт управляющий сигнал автономному инвертору напряжения. Также система управления включает в себя датчик частоты вращения двигателя, датчики токов фаз А, В, С двигателя и датчик напряжения звена постоянного тока статического преобразователя.

Разработана модель данной системы энергоэффективного двухзонного регулирования в основной библиотеке ПК *Matlab/Simulink* с использованием уравнений АД на основе обобщенной машины и уравнений, описывающих функционирование ДТС и регуляторов скорости роторов АД. Моделировались варианты с пропорциональным и пропорционально-интегральным регулятором скорости. Особым звеном модели является блок задания потокосцепления статора, в котором реализована зависимость потокосцепления от момента двигателя. На вход этого блока подается сигнал задания момента с выхода блока вычисления задания момента. Именно с помощью зависимости $\psi'_{s3} = f(M_3)$ реализуется алгоритм управления асинхронным электроприводом по критерию минимума тока статора. В данной системе электропривода для разгона двигателя необходимо установить заданный (начальный) уровень потокосцепления. Для этого используется режим предварительного намагничивания, заключающийся в установке задания на потокосцепление на заданном начальном уровне $\psi_{s3нач}$ при задании на момент, равном нулю. После намагничивания АД за фиксированное время t происходит переключение с начального значения потокосцепления $\psi_{s3нач}$ на расчетную зависимость $\psi'_{s3} = f(M_3)$. Для сглаживания пульсаций значения задания на потокосцепление ψ_{s3} , подаваемого в блок ДТС, включен фильтр 1-го

порядка с настраиваемой постоянной времени T_k .

Кроме того, представленная система управления асинхронным электроприводом снабжена блоком, реализующим наиболее полное использование двигателя по нагреву и мощности. Повышенное использование АД достигается с помощью изменения ограничения задания на момент АД в блоке вычисления задания на момент – БВЗМ (рис. 1). Это реализуемо в данной системе благодаря тому, что применение специального задатчика потокосцепления, снижающего значение потребляемого тока, позволяет поднять на некоторую величину ограничение задания на момент, не допуская при этом перегрева обмоток асинхронного двигателя [4].

Определение ограничения задания на момент, вычисленного регулятором скорости, выполняется путем деления заданной мощности на частоту вращения ротора двигателя. Причём величина заданной мощности определяется в зависимости от температуры обмоток статора двигателя, вычисляемой по модели в блоке АМД, и может принимать три фиксированных значения: 1) $P_3 = P_n$; 2) $P_3 > P_n$; 3) $P_3 < P_n$, где P_3 – заданная мощность; P_n – номинальная мощность двигателя. При регулировании скорости в первой зоне и частоте вращения двигателя меньше номинальной частоте от деления заданной мощности на частоту вращения ограничивается на уровне максимально допустимого задания на момент. В БВЗМ определяются ограничения и окончательное задание на момент M_3 , поступающее в блок ДТС, по уравнениям

$$M_{3огр} = \frac{P_3}{\omega};$$

$$\begin{aligned} \text{если } M_{3огр} \geq M_{3max}, \quad M_{3огр} &= M_{3max}; \\ \text{если } M_{3огр} < M_{3огр}, \quad M_3 &= M_{3огр}; \\ \text{если } M_{3огр} \geq M_{3огр}, \quad M_3 &= M_{3огр}, \end{aligned}$$

где $M_{3огр}$ – ограничение задания на момент АД; M_{3max} – ограничение по моменту, устанавливаемое обычно исходя из допустимого тока вентилях статического преобразователя.

Величина заданной мощности P_3 определяется в зависимости от температуры обмоток статора θ двигателя по следующим логическим уравнениям (темпера-

тура θ может быть как вычислена по модели, так и измерена при помощи датчиков, встроенных в обмотку статора [4]:

$$\begin{aligned} \text{если } \theta < 0,9\theta_{\text{доп}}, & P_3 = 1,2P_n; \\ \text{если } 0,9\theta_{\text{доп}} \leq \theta \leq \theta_{\text{доп}} & P_3 = P_n, \\ \text{если } \theta > \theta_{\text{доп}}, & P_3 = 0,9P_n, \end{aligned}$$

где $\theta_{\text{доп}}$ – допустимая температура обмотки статора АД.

Изменение заданной мощности P_3 в зависимости от температуры обмоток позволяет без сокращения срока службы повышать мощность двигателя, временно перегружая его в случае необходимости (например, при преодолении подъема транспортным средством или снижении давления в магистрали при увеличении разбора жидкости), но при этом предохранять двигатель от превышения температуры. Одновременно предлагаемая реализа-

ция энергосберегающего двухзонного регулирования в системе прямого управления моментом позволяет снизить потери и повысить КПД асинхронного двигателя.

В качестве примера на рис. 2, 3 приведены результаты моделирования разгона электропривода с асинхронным тяговым двигателем DAT-305 до номинальной скорости при максимально допустимом моменте АД. При этом отслеживалось изменение тока статора и момента тягового асинхронного двигателя. По осциллограммам тока и момента наглядно прослеживается снижение тока статора (рис. 2а) при использовании задатчика потокосцепления, однако несколько возрастают пульсации электромагнитного момента АД (рис. 2б).

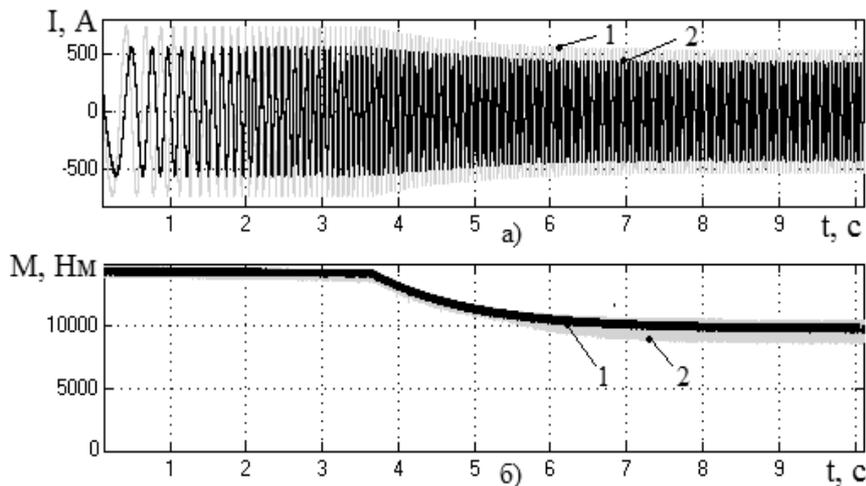


Рис. 2. Результаты моделирования динамических процессов АД: а – зависимости тока статора АД от времени без задатчика потокосцепления (1) и с задатчиком потокосцепления (2); б – зависимости момента АД от времени без задатчика потокосцепления (1) и с задатчиком потокосцепления (2)

В общем случае в первой зоне регулирования скорости при реализации низких скоростей и заданий на момент (в случае пониженной нагрузки двигателя) задание на потокосцепление статора автоматически снижается по рассчитанной кривой $\psi'_{s3} = f(M_3)$. При увеличении нагрузки задание на момент возрастает и соответственно увеличивается задание на потокосцепление статора. По мере разгона двигателя и увеличения частоты вращения ω вверх от номинального значения задание на момент с учетом принятых ограничений неизбежно снижается. Одновременно снижается задание на потокосцепление статора по той же расчетной зависимости $\psi'_{s3} =$

$f(M_3)$. При этом двигатель автоматически переходит в зону ослабления поля (во вторую зону).

Для исключения высокочастотных гармоник тока при работе двигателя на холостом ходу зависимость потокосцепления статора в задатчике ограничивается нижним пороговым значением. Аперiodическое звено 1-го порядка, стоящее после задатчика потокосцепления, позволяет сгладить выходное значение задатчика и уменьшить пульсации момента тягового двигателя. С использованием разработанной математической модели энергоэффективного асинхронного электропривода с прямым управлением моментом была ис-

следована возможность оптимизации (снижения) потребления тока статора в различных режимах работы электропривода. На рис. 3 представлены увеличенные

осциллограммы токов статора, полученные в результате моделирования процессов в тяговом электроприводе, наглядно иллюстрирующие эффект снижения тока.

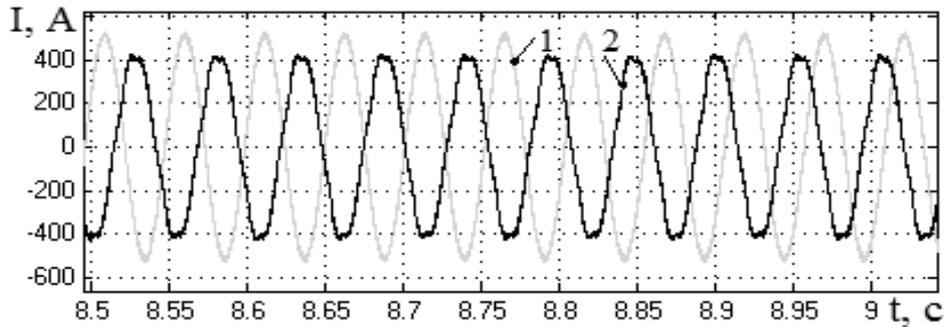


Рис. 3. Графики токов статора в увеличенном масштабе: 1- без задатчика потокосцепления; 2 – с задатчиком потокосцепления

На рис. 4, 5 представлены результаты моделирования разгона тягового электропривода во второй зоне регулирования. В

рассматриваемом случае переход электропривода во вторую зону осуществляется с момента времени около 10 с ($t = 10$ с).

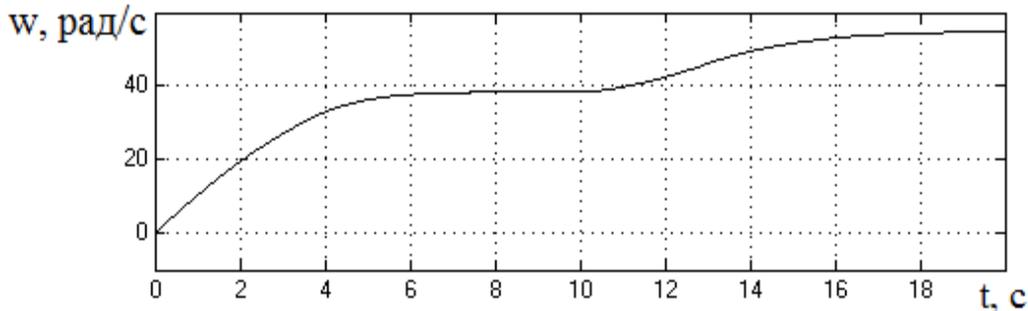


Рис. 4. График скорости АД при двухзонном регулировании

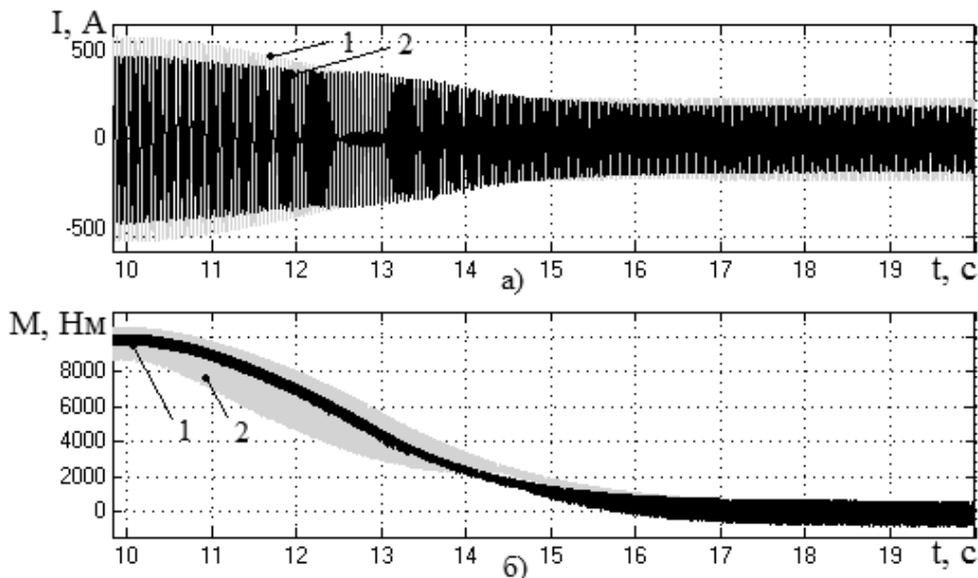


Рис. 5. Результаты моделирования процессов АД во второй зоне регулирования: а – зависимости тока статора АД от времени без задатчика потокосцепления (1) и с задатчиком потокосцепления (2); б – зависимости момента АД (2) от времени без задатчика потокосцепления (1) (3) и с задатчиком потокосцепления (2)

Ниже для сравнения приведены осциллограммы токов и моментов тягового асинхронного двигателя во второй зоне регулирования скорости с применением и без применения оптимизирующего задатчика потокосцепления.

Адекватность модели электропривода с DTC проверена путем сравнения результатов моделирования динамических процессов в электроприводе с осциллограммами экспериментальных исследований, выполненных на лабораторной установке, оборудованной преобразователем частоты ACS850 фирмы «ABB» с DTC. В модель были подставлены параметры электропривода лабораторной установки. Максимальное расхождение расчетных и экспериментальных данных по моменту составляет 6 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козярук, А.Е. Системы прямого управления моментом в частотно-регулируемых электроприводах переменного тока / А.Е. Козярук, В.В. Рудаков; под ред. А.Г. Народицкого. – СПб.: С.-Петербург. электротехн. компания, 2005.
2. Козярук, А.Е. Современное и перспективное алгоритмическое обеспечение частотно-регулируемых электроприводов / А.Е. Козярук, В.В. Рудаков. – СПб.: С.-Петербург. электротехн.
1. Kozyaruk, A.E., Systems for Direct Moment Control in Variable-Frequency electric AC-drives / A.E. Kozyaruk, V.V. Rudakov; under the editorship of A.G. Naroditsky. – S-Pb.: S-Petersburg Electrotechnical Co., 2005.
2. Kozyaruk, A.E., Modern and Promising Algorithmic Support of Frequency-Controlled Electric Drives / A.E. Kozyaruk, V.V. Rudakov. – S-Pb.: S-Petersburg Electrotechn. Co., 2004.

По результатам моделирования можно сделать вывод, что применяемые алгоритмы регулирования обеспечивают снижение энергопотребления за счет уменьшения тока статора. При включении в систему блока задания потокосцепления статора снижение тока достигает 7-10 %. При работе электропривода с пониженной нагрузкой для тяговых электродвигателей, обладающих высоким намагничивающим током, эффект возрастает до 20-23 %. При этом несколько увеличивается КПД двигателя (на 3-4 %). Данный алгоритм регулирования с минимизацией тока статора вполне наглядно иллюстрирует возможные перспективы энергосбережения в системе DTC тягового электропривода.

- компания, 2004.
3. Способ управления асинхронными тяговыми двигателями, подключенными параллельно к одному инвертору: пат. РФ на изобрет. RU 2428326/ Федяева Г.А., Федяев Н.А., Матюшков С.Ю., Роговцев Г.В.//Официальный бюллетень Российского агентства по патентам и товарным знакам. Изобретения. Полезные модели. – Опубл. 10.09.11, Бюл. № 25.
3. Method for control of asynchronous propulsion engines connected parallel up to one inverter: Pat. RF for Invention RU 2428326/ Fedyayeva G.A., Fedyayev N.A., Matyushkov S.Yu., Rogovtsev G.V.//Official Bulletin of Russian Agency for Patents and Trade Marks. Inventions. Utility Models. – Published 10.09.11, Bulletin № 25.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ (НИР № 1633 (06/62) «Прогнозирование динамических процессов в электронных системах».

Статья поступила в редколлегию 20.11.2015.

*Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета
Потанов Л.А.*

Сведения об авторах:

Конохов Дмитрий Владимирович, аспирант кафедры «Электронные, радиоэлектронные и электротехнические системы» Брянского государственного технического университета, тел.: (4832) 62-37-25, e-mail: jos924@yandex.ru.

Федяева Галина Анатольевна, д.т.н., профессор кафедры «Электронные, радиоэлектронные и электротехнические системы» Брянского государственного технического университета, тел.: (4832) 56-36-02, e-mail: galina-fed@yandex.ru.

Тарасов Алексей Николаевич, аспирант кафедры «Электронные, радиоэлектронные и электротехнические системы» Брянского государственного технического университета, тел.: (4832) 56-36-02, e-mail: tarasov.79@inbox.ru.

Konokhov Dmitry Vladimirovich, Post graduate student of the Dep. “Electronic-, Radio-electronic-, and Electro-technical Systems”, Bryansk State Technical University, Phone: (4832)62-37-25, e-mail: jos924@yandex.ru.

Fedyeva Galina Anatolievna, D.Eng., Prof. of the Dep. “Electronic-, Radio-electronic-, and Electro-technical Systems”, Bryansk State Technical Universi-

Сморудова Татьяна Владимировна, аспирантка кафедры «Электронные, радиоэлектронные и электротехнические системы» Брянского государственного технического университета, тел.: (4832) 56-36-02, e-mail: farabellum@gmail.com.

ty, Phone:(4832) 56-36-02, e-mail: galina-fed@yandex.ru.

Tarasov Alexey Nikolayevich, Post graduate student of the Dep. “Electronic-, Radio-electronic-, and Electro-technical Systems”, Bryansk State Technical University, Phone: (4832) 56-36-02, e-mail: tarasov.79@inbox.ru.