

КОСМИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА. КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ. ИССЛЕДОВАНИЕ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

УДК 519.712.7

ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МИКРОКОНТРОЛЛЕРНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЯ-МАХОВИКА В РЕЖИМЕ ЗАДАННОЙ СКОРОСТИ

В. В. Некрасов

Создание микроконтроллерной системы управления двигателем-маховиком для высокودинамичных космических аппаратов на российской элементно-компонентной базе позволило сформулировать постановку задачи по поиску функции управления в режиме заданной скорости вращения ротора двигателя-маховика. В данной статье изложен один из возможных вариантов математического исследования поставленной задачи, в рамках которого процесс выхода и поддержания устойчивого значения требуемой скорости разделен на 3 этапа. Для подзадачи каждого этапа предложены оптимальные решения, применены: метод Эйлера, метод наименьших квадратов, двухпозиционный и пропорционально-интегральный законы регулирования. В результате решения поставленной научной задачи построена математическая модель функции управления скоростью вращения ротора двигателя-маховика в реальном масштабе времени. По итогам проделанной работы осуществлены натурные испытания полученной функции управления и сделаны рекомендации о возможном внедрении проделанного исследования.

Ключевые слова: двигатель-маховик, микроконтроллерная система управления, высокودинамичные космические аппараты, функция управления скоростью.

Введение

В качестве исполнительных органов систем ориентации и стабилизации различных космических аппаратов (КА) применяют двигатели-маховики (ДМ). С появлением радиационно стойкой микроконтроллерной техники появились новые возможности в управлении ДМ, а следовательно, и космическим аппаратом. В связи с отсутствием импортонезависимого двигателя-маховика, обладающего передовыми возможностями, по сравнению с российскими и зарубежными аналогами, в АО «Корпорация «ВНИИЭМ» (одном из лидирующих предприятий по созданию космической техники в Российской Федерации) возникла необходимость в разработке нового поколения двигателей-маховиков с цифровым микроконтроллерным управлением (рис. 1).

Изменение скорости вращения махового колеса создает управляющий момент, воздействующий на КА. До настоящего времени управление ДМ в изделиях АО «Корпорация «ВНИИЭМ» осуществлялось по заданному крутящему моменту (режим управления моментом). Ввод микроконтроллерного управления в схему ДМ обеспечивает возможность реализации режима высокоточной стабилизации скорости ротора, позволяющего бороться с различного рода паразитными моментами при стабилизации КА. Также появляется возможность осуществлять с

пошаговым контролем (величина шага задается тактом общения с бортовым комплексом управления (БКУ) КА) изменение скорости вращения ДМ, необходимого для фактической оценки управляющего воздействия на КА. Такой режим позволяет обеспечивать ДМ стабильными техническими характеристиками, несмотря на возможную нелинейность передаточной функции и износ системы в течение всего времени эксплуатации.



Рис. 1. Общий вид двигателя-маховика с цифровым управлением

Концепция создания цифрового микроконтрольного управления нового поколения ДМ ориентирована на обеспечение характеристик ДМ, как исполнительных органов системы ориентации и стабилизации высокдинамичного КА. Эта концепция подразумевает осуществление КА маневров на максимально высоких допустимых значениях управляющих моментов, создаваемых системой ДМ, и высокоточную стабилизацию КА за кратчайшее время.

Постановка решаемой задачи

Для осуществления натурного моделирования создан макет двигателя-маховика с цифровым микроконтроллерным управлением (ДМ-МК). За основу создания концептуальной модели взята аналоговая схема ДМ, разработанного и выпускаемого АО «Корпорация «ВНИИЭМ» (ДМ20-250), маховичный электропривод которого выполнен на основе бесконтактного электродвигателя постоянного тока (БДПТ) [1]. Цифровая схема управления реализована микроконтроллерным модулем (МКМ) [2]. Для организации обратной связи по скорости вращения ДМ-МК в схему электромеханического блока (ЭМБ) введен оптоэлектрический датчик скорости [3], информация с которого для дальнейшей обработки поступает в МКМ (рис. 2). Анализируя сигналы управления с БКУ КА и информационные сигналы с датчика скорости ЭМБ, МКМ формирует необходимое аналоговое управляющее напряжение (U_c), пропорцио-

нально которому ЭМБ создает крутящий момент на валу ДМ-МК.

По итогам успешной экспериментальной проверки макета ДМ-МК на работоспособность в стандартном режиме управления моментом сформулирована следующая научная задача [4]:

Дано: основные технические характеристики ДМ-МК (табл. 1) и требования к допустимому отклонению частоты вращения ротора в режиме управления по скорости ДМ-МК (табл. 2).

Найти: функцию управления ДМ-МК в режиме заданной скорости.

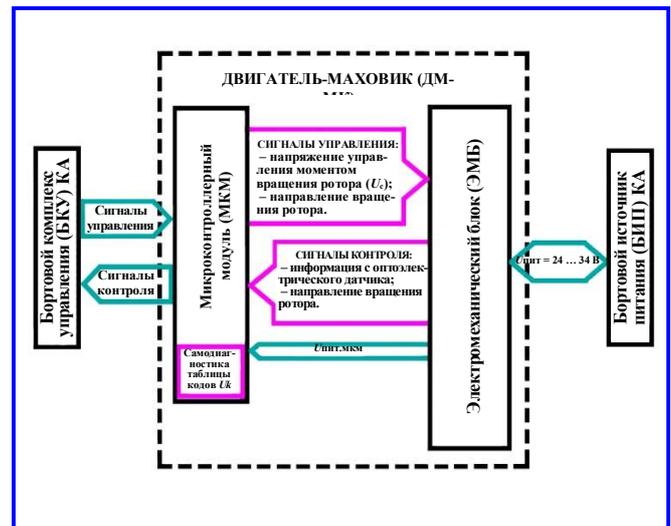


Рис. 2. Блок-схема ДМ-МК

Таблица 1

Основные технические характеристики ДМ-МК

Управляющий момент, Н·м	1
Кинетический момент, Н·м·с	±10
Диапазон изменения частоты вращения, об/мин	±1360
Максимальный потребляемый ток, А	10
Число импульсов на оборот (N_{imp}), шт.	1360
Погрешность значения количества импульсов за оборот (N_e), шт.	±1
Время обновления информации о скорости вращения ротора, мс	не более 100
Масса, кг	8
Напряжение питания, В	24 ... 34
Тип семейства микроконтроллера	MCS-51
Дискретность ($U_{упр}$)	4095
Такт общения ($\Delta t_{БКУ}$) с БКУ КА, мс	100
Срок службы, лет	не менее 12

Таблица 2

Требования к допустимому отклонению частоты вращения ротора в режиме управления по скорости ДМ-МК

При неизменной заданной частоте (Вариант А), об/мин	не более 1
При темпе изменения заданной частоты не более 1000 об/мин ² (Вариант В), об/мин	не более 1
При темпе изменения заданной частоты вращения в диапазоне от 1000 до 8000 об/мин ² (Вариант С), об/мин	не более 2

Для поиска функции управления ДМ-МК в режиме заданной скорости необходимо проанализировать внутренние связи и воздействующие факторы. Отметим, что поиск осуществляется для всего рабочего диапазона скоростей вращения ротора, где величины тормозных моментов, наличие которых обусловлено различными факторами (в том числе моменты трения подшипников, изменяющиеся свойства смазок, термические процессы в конструкции и т. д.), для разных скоростей различны. Поэтому в решаемой задаче необходимо учитывать нелинейность данной системы, обусловленной изменением электромеханических характеристик во время работы в течение всего срока жизни изделия.

Построение математической модели для решения научной задачи

При построении математической модели были проанализированы различные варианты математического исследования поставленной задачи [5 – 7]. В результате проведенного анализа был предложен один из возможных вариантов математического исследования поставленной задачи, основанный на применении законов регулирования теории автоматического управления [8, 9] и различных математических методов [10]. В рамках данного исследования процесс выхода и поддержания устойчивого значения требуемой скорости был разделен на 3 этапа. В данных этапах решались разные подзадачи, требующие индивидуальных подходов для обеспечения оптимальных решений. Таким образом, были применены: метод Эйлера, метод наименьших квадратов, двухпозиционный и пропорционально-интегральный законы регулирования.

Концепция построения математической модели базируется на разработке высокодинамичного КА, то есть на поиске быстреего выхода и стабилизации значения требуемой скорости (V_{req}) вращения ротора ДМ. Разница между V_{req} и реальной (V_r) скоростями вращения ротора ДМ определяет значение ошибки скорости (E). Задача сводится к формированию МКМ управляющего сигнала U_c с целью достижения и обеспечения нулевого значения E ($E=0$). Отметим, что отклонение частоты вращения ротора в режиме управления по скорости ДМ-МК допустимо в пределах требований к ДМ (см. табл. 2).

Такт общения с БКУ КА ($\Delta t_{БКУ}$) определяет максимально допустимое время обновления информации о скорости вращения (V_r) ДМ-МК, то есть до 125 мс (табл. 1).

Для поиска оптимального решения в поставленной задаче процесс выхода и поддержания устойчивого значения требуемой скорости с необходимой погрешностью за максимально короткое время во всем диапазоне требуемых скоростей, т. е. функцию управления рассмотрим как 3 слагаемых этапа. Каждый этап выполняет свою подзадачу, требующую оптимального подхода и методологии решения (рис. 3). Отметим, что во всех этапах контролируется E , от значения которой принимается решение о выполнении номера этапа выхода и поддержания устойчивого значения требуемой скорости.

Этап 1 выхода и стабилизации новой V_{req} решает подзадачу максимально быстрого уменьшения E , до значения времени t_{a1} , с которого будет осуществляться этап 2 (см. рис. 3). Данный этап осуществляется с помощью двухпозиционного закона регулирования, соответственно значение U_c будет иметь значения: $U_c = U_m$ или $U_c = 0$, где U_m – максимальное значение U_c .

Этап 2 выхода и стабилизации новой V_{req} решает подзадачу максимально точного выхода на V_r за время $\Delta t_2 [t_{a1}; t_{a2}] \leq \Delta t_{БКУ}$ (125 мс, см. табл. 1). Обработка данного этапа начинается, как только обновленное значение E становится:

$$E \leq \Delta E_m,$$

где ΔE_m – максимальное значение E за такт обновления информации о V_r .

При этом значение $U_{c0} = 0$, где U_{c0} – значение U_c по итогам окончания отработки этапа 1.

Спрогнозируем точный выход на V_{req} , чтобы по итогам отработки $\Delta t_{БКУ} = 125$ мс значение $E = 0$. Воспользуемся разложением функции в бесконечную сумму степенных функций с помощью ряда Тейлора.

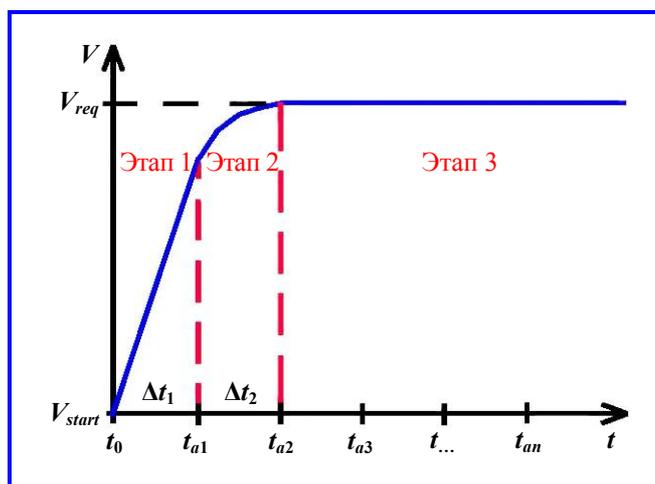


Рис. 3. Этапы выхода и стабилизации новой требуемой скорости

Определение: многочленом Тейлора функции $f(u)$ вещественной переменной u , дифференцируемой k раз в точке t , называется конечная сумма:

$$\sum_{n=0}^k \frac{f^{(n)}(t)}{n!} (u-t)^n = f(t) + f'(t)(u-t) + \frac{f^{(2)}(t)}{2!} (u-t)^2 + \dots + \frac{f^{(k)}(t)}{k!} (u-t)^k.$$

Определим численный метод вычисления обыкновенного дифференциального уравнения для решаемой подзадачи этапа 2 (метод Эйлера, модифицированный метод Эйлера или метод Рунге – Кутты). Для этого рассчитаем максимально возможное количество (k) дифференциализаций функции управления $f(u)$ за $\Delta t_{\text{БКУ}}$. Найдем минимальное время одной дифференциализации (Δt_d). Δt_d определяется: требованиями к допустимому отклонению частоты вращения ротора в режиме управления по скорости ДМ-МК (расчет производится по требованию к E : не более 1 об/мин, удовлетворяющего всем вариантам табл. 2), числом импульсов на оборот ($N_{i/m}$, см. табл. 1), погрешностью измерения количества импульсов (N_e , см. табл. 1) и максимальной требуемой скоростью вращения ротора ДМ ($V_{req.m}$). Так как $N_e = \pm 1$, то для обеспечения требований табл. 2 определяем цену значения измерения единичной E ($E1$) не более 0,5 имп/об. Следовательно, численно $N_{i/m}E1 = V_{req.m}$, значение Δt_d будет вычислено по следующей формуле:

$$\Delta t_d = \frac{1}{V_{req.m}} 2 = \frac{1}{22,667} 2 = 0,08824, \text{ с},$$

где $V_{req.m} = 1360 \text{ об/мин} = 22,667 \text{ об/с}$.

Таким образом, для обеспечения всех дифференциализаций за $\Delta t_{\text{БКУ}}$ (125 мс) необходимо принять $k = 1$, следовательно численным методом вычисления обыкновенного дифференциального уравнения решаемой подзадачи этапа 2 для обеспечения максимальной аппроксимации $f(u)$, то есть по итогам отработки функции управления обеспечения $E = 0$, выполняем расчет:

$$U_{c1} = \frac{U_{c.m.}}{\Delta E_m} E;$$

$$dt = 88,24 \text{ мс};$$

$U_c = U_{c0} + dtU_{c1}$, формула для этапа 2, метод Эйлера, где E – значение ошибки в цикл дифференцирования;

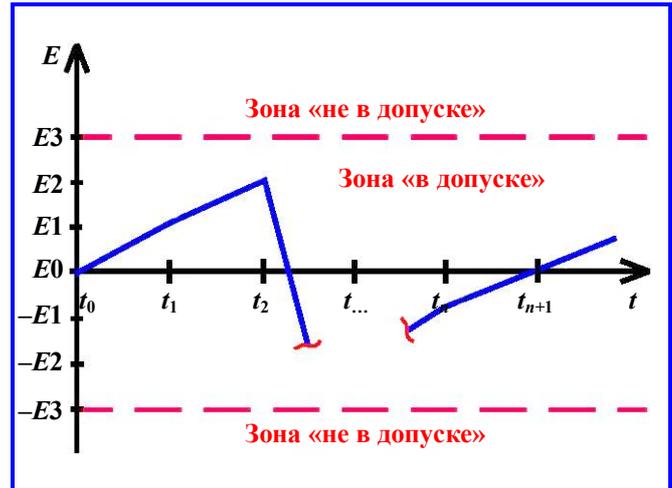


Рис. 4. Зона допуски при стабилизации V_{req}

ΔE_m – максимально возможное значение изменения E за время сбора и обновления информации о реальной скорости вращения ротора ДМ; U_{c1} – аналоговое управляющее напряжение в цикл дифференцирования.

Этап 3 выхода и стабилизации новой V_{req} решает подзадачу поддержания V_{req} в рамках допустимых требований (табл. 2). Для реализации данного этапа было принято решение использовать математический метод наименьших квадратов (МНК), основанный на минимизации суммы отклонений некоторых функций от искомым переменных:

$$\sum_n e_n^2 = \sum_n (E_0 - E_n)^2,$$

где E_0 – идеальное значение $E = 0$; E_n – обновленное значение E после завершения очередного цикла измерения.

Цена $E1 = 0,5$ имп/об измерения величины V_r было принято решение осуществлять на значении $dt = 88,24$ мс, равного времени дифференцирования этапа 2 (для облегчения математической обработки МКМ).

Отметим, что при стабилизации V_{req} на значение скорости вращения ДМ влияют тормозные моменты различного свойства (тормозные моменты подшипников, изменяющиеся свойства смазок и т. д.), приводящие к отклонениям от V_{req} (рис. 4), поэтому необходимо формировать компенсирующее их управляющее воздействие. Таким образом, для стабилизации, кроме контролирующего изменения E (методом МНК), реализован пропорционально-интегральный закон регулирования. Величина минимального значения пропорционального

звена компенсации ошибки формируется пропорционально создаваемому необходимому ускорению ДМ. Значение интегрального звена формируется путем снятия электромеханических характеристик ДМ и формирования соответствующей таблицы кодов значений, подставляемых для V_{req} в этапе 3 (рис. 3). В процессе работы ДМ осуществляется самодиагностика системы, корректирующая таблицу кодов значений, загружаемых в интегральное звено [11].

Заключение

По итогам проделанной работы с помощью метода Эйлера, метода наименьших квадратов, двухпозиционного и пропорционально-интегрального законов регулирования построена математическая модель функции управления ДМ в режиме заданной скорости вращения ротора для высокочастотных КА в реальном масштабе времени. Натурные испытания, проведенные на макете ДМ-МК, подтвердили выполнение решаемой задачи. Планируемое внедрение – 2019 год.

Автор выражает признательность Л.А. Макриденко, А.П. Сарычеву, С.В. Медушеву, А.В. Рогозе, М.Ю. Щетинину, В.К. Кузьмину, Р.С. Городецкому, В.К. Кубраку, И.В. Соколунину за возможность создания и содействие в отработке цифрового управления на образцах двигателей-маховиков, разработанных и выпускаемых АО «Корпорация «ВНИИЭМ».

Литература

1. Анучин А. С. Системы управления электроприводами : учебник для вузов / А. С. Анучин. – М. : Издательский дом МЭИ, 2015. – 373 с. : ил.
2. Унифицированный модуль управления СОСБ малых космических аппаратов на основе микроЭВМ / В. В. Некрасов, М. Ю. Щетинин // Вопросы электромеханики. Труды НИП ВНИИЭМ. – 2008. – Т. 107. – С. 46 – 50.
3. Калачев Ю. Н. Векторное регулирование (замечки практика) / Ю. Н. Калачев ; компания «ЭФО». – М., 2013. – 63 [9] с. : ил.

4. Постановка научной задачи по разработке нового двигателя-маховика для управления малыми космическими аппаратами / В. Д. Бабишин, В. В. Некрасов, К. А. Соседко // ТРУДЫ МКЭЭЭ-2018. – Алушта, 2018. – С. 149 – 151.

5. Устенко А. С. Основы математического моделирования и алгоритмизации процессов функционирования сложных систем / А. С. Устенко. – 2000. – URL: <http://dit.isuct.ru/IVT/BOOKS/Model/Model2/index.html>: дата обращения 24.07.2019.

6. Определение с помощью графов функции микроконтроллерной системы управления двигателя-маховика в режиме заданной скорости для высокочастотных аппаратов // В. В. Некрасов, В. Д. Бабишин, К. А. Соседко / АО «Корпорация «ВНИИЭМ»; Тезисы докладов Седьмой международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли». – М. : АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2019 – С. 136 – 137. – URL: http://www.vniem.ru/uploads/files/conferences/190513/sbornik_tezisov_2019.pdf (24.07.2019).

7. Управление малым космическим аппаратом с использованием двигателя-маховика на основе метода управления поводярем / О. А. Толпегин, П. Ю. Литвинова // Вестник череповецкого государственного университета. – Череповец, 2017. – № 6 (81) – С. 44 – 52.

8. Теория автоматического управления : учеб. для вузов по спец. «Автоматика и телемеханика». В 2-х ч. Ч. I. Теория линейных систем автоматического управления / Н. А. Бабаков, А. А. Воронов, А. А. Воронова [и др.]; под ред. А. А. Воронова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Высшая школа, 1986. – 367 с., ил.

9. Теория автоматического управления : учеб. для вузов по спец. «Автоматика и телемеханика». В 2-х ч. Ч. II. Теория нелинейных и специальных систем автоматического управления / Н. А. Бабаков, А. А. Воронов, А. А. Воронова [и др.]; под ред. А. А. Воронова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 1986. – 504 с.

10. Бабенко К. И. Основы численного анализа / К. И. Бабенко. – М. : Наука, 1986. – 744 с.

11. Статические методы оценки стабильности функционирования технических систем / В. Н. Клячкин, И. Н. Карпунина // Надежность и качество сложных систем. – Пенза, 2018. – № 2. – С. 36 – 42.

Поступила в редакцию 24.07.2019

*Владимир Викторович Некрасов, ведущий инженер, аспирант, т. 366-20-56, e-mail: vvv17@list.ru.
(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).*

BUILDING A MATHEMATICAL MODEL OF MICROCONTROLLER SYSTEM FOR REACTION WHEEL IN SPECIFIED SPEED

V. V. Nekrasov

Development of a microcontroller system for reaction wheels of highly dynamic spacecraft based on Russian components provided the possibility to formulate the problem of control function search in specified reaction wheel rotor speed mode. This article presents one of

the possible variants of mathematical study of the set problem, in the scope of which the process of reaching and maintaining the required speed is divided into three stages. To address the issues of each stage, the optimal solutions are offered: Euler's method, least square method, two-position and proportional-integral control laws have been applied. As a result of solving the formulated scientific problem, a real-time mathematical model of reaction wheel rotor speed control function has been built. Following the fulfilled work, the actual tests of the obtained control function have been carried out, and recommendations on the possible introduction of the performed study have been made.

Key words: reaction wheel, microcontroller system, highly dynamic spacecraft, speed control function.

References

1. Anuchin A. S. Electric drives control systems : textbook for higher education / A. S. Anuchin. – M. : Publishing House of Moscow Power Engineering Institute, 2015. – 373 p.: with figures.
2. Unified control module for solar array orientation systems of small satellites on the basis of microcomputer / V. V. Nekrasov, M. Iu. Shchetinin // Matters of Electromechanics. NPP VNIEM Proceedings. – 2008. – V. 107. – Pp. 46 – 50.
3. Kalachev Iu. N. Vector control (practician's notes) / Iu. N. Kalachev ; EFO Company. – M., 2013. – 63 [9] p. : with figures.
4. Formulating a scientific problem of development of a new reaction wheel for control of small satellites / V. D. Babishin, V. V. Nekrasov, K. A. Sosedko // Proceedings of ICEEE-2018 (International Conference on Electromechanics, Electrotechnology, Electromaterials and Components). – Alushta, 2018. – Pp. 149 – 151.
5. Ustenko A. S. Basic principles of mathematical modeling and algorithmization of complex system operation processes / A. S. Ustenko. – 2000. – URL: <http://dit.isuct.ru/IVT/BOOKS/Model/Model2/index.html> (24.07.2019).
6. Determination of function of reaction wheel microcontroller system in specified speed mode for highly dynamic spacecraft with the use of diagrams // V. V. Nekrasov, V. D. Babishin, K. A. Sosedko / 'VNIEM Corporation' JC; Abstracts of proceedings of VIIth International Scientific Conference 'Critical Issues in Designing of Earth Remote Sensing Systems'. – M. : 'VNIEM Corporation' JC, 2019 – Pp. 136 – 137. – URL: http://www.vniem.ru/ru/uploads/files/conferences/190513/sbornik_tezisov_2019.pdf (24.07.2019).
7. Small satellite control with the use of reaction wheels on the basis of the method of control with a guide / O. A. Tolpegin, P. Iu. Litvinova // Bulletin of the Cherepovets State University. – Cherepovets, 2017. – No. 6 (81) – Pp. 44 – 52.
8. Automatic control theory : textbook for higher education in the specialty 'Automatics and telemechanics'. In two parts. Part I. Theory of linear systems for automatic control / N. A. Babakov, A. A. Voronov, A. A. Voronova [et al.]; edited by A. A. Voronov. – 2nd ed., revised and enlarged. – M. : Vysshaya Shkola Publishers, 1986. – 367 p., with figures.
9. Automatic control theory : textbook for higher education in the specialty 'Automatics and telemechanics'. In two parts. Part II. Theory of non-linear and special systems for automatic control / N. A. Babakov, A. A. Voronov, A. A. Voronova [et al.]; edited by A. A. Voronov. – 2nd ed., revised and enlarged. – M. : Vysshaya Shkola Publishers, 1986. – 504 p.
10. Babenko K. I. Basic principles of numerical analysis / K. I. Babenko. – M. : Nauka (Science) Publishers, 1986. – 744 p.
11. Statistical methods of assessment of technical system operation stability / V. N. Kliachkin, I. N. Karpunina // Reliability and quality of complex systems. – Penza, 2018. – No. 2. – Pp. 36 – 42.

Vladimir Viktorovich Nekrasov, Leading Engineer, Ph. D. Student, tel.: +7 (495) 366-20-56, e-mail: vvv17@list.ru. (JC «VNIEM Corporation»).