

**Biryukov Vadim Nikolaevich** – Southern Federal University; e-mail: vnbiryukov@sfnedu.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371632; the department of fundamentals of radio engineering; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Zubkov Pavel Nikolaevich** – e-mail: pavelzubkov1995@yandex.ru; the department of fundamentals of radio engineering; student.

**Pilipenko Alexandr Mikhaylovich** – e-mail: ampilipenko@sfnedu.ru; the department of fundamentals of radio engineering; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 62-50

**А.И. Воронин, В.В. Тютиков**

**МЕТОДИКА СИНТЕЗА РЕГУЛЯТОРОВ ДЛЯ НЕЗАВИСИМОГО  
ФОРМИРОВАНИЯ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ  
НЕЛИНЕЙНЫХ ОБЪЕКТОВ\***

*Развитие технологий приводит к повышению требований к статическим и динамическим показателям исполнительных устройств различных технологических и специальных нелинейных объектов. Решить проблему независимого формирования указанных показателей можно на основе разработки новых методик для синтеза устройств автоматического управления. В основу исследования положены методы аналитического конструирования агрегированных регуляторов и модального управления. Разработана двухэтапная методика синтеза регуляторов, позволяющая на основе комбинации указанных методов независимо формировать качество переходных процессов и статическую точность систем автоматического управления нелинейными объектами, имеющими в математическом описании нелинейные элементы, которые можно описать аналитическими функциями. Метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов на основе векторно-матричного описания нелинейного объекта управления позволяет синтезировать систему с регулятором состояния, обладающую свойствами линейной. При этом уравнения, входящие в математическое описание полученной системы автоматического управления в пространстве состояний, могут содержать нелинейные элементы, и по их виду сложно судить о линейности математической модели в целом. Далее система автоматического управления, описание математической модели которой осуществляется в виде передаточной функции, является объектом при синтезе методом модального управления полиномиального регулятора, обеспечивающего заданные показатели функционирования. Таким образом, последовательное применение двух методов синтеза позволяет получить требуемое качество процессов управления. Модельный пример с использованием типового электромеханического объекта – электродвигателя постоянного тока последовательного возбуждения с табличной нелинейностью «кривая намагничивания», аппроксимированной аналитической функцией, подтверждает эффективность предложенного подхода к формированию качества процессов в нелинейных объектах.*

*Статические и динамические показатели качества; аналитическое конструирование агрегированных регуляторов; модальное управление; полиномиальный регулятор.*

**A.I. Voronin, V.V. Tyutikov**

**PROCEDURE FOR THE SYNTHESIS OF CONTROLLERS  
FOR INDEPENDENT FORMATION OF STATIC AND DYNAMIC  
PARAMETERS OF NONLINEAR OBJECTS**

*Technological development leads to increasing requirements for static and dynamic indicators of actuators in various technological and special nonlinear objects. The solution to the problem of independent formation of these indicators can be found in the development of new methods*

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки в рамках базовой части государственного задания.

*for the synthesis of automatic control devices. Method of analytical design of aggregated regulators based on vector-matrix description of nonlinear control object allows you to synthesize the system controller status, having the properties of linear. Then the equations that are included in the mathematical description of the resulting system of automatic control in the state space may contain nonlinear elements, and in their mind it is difficult to judge the linearity of the mathematical model in general. Further, the automatic control system, description of a mathematical model which takes the form of a transfer function is an object in the synthesis method of modal control of polynomial controller, providing specified performance. Thus, the successive application of two methods of synthesis allows to obtain the required quality control processes. Model example using the Electromechanical model of the object - DC motor series excitation table-valued nonlinearity of the «magnetization curve», approximated by an analytical function, confirms the effectiveness of the proposed approach to developing quality processes in nonlinear objects.*

*Static and dynamic parameters of quality; analytical designing of aggregated regulators; polynomial regulator.*

Проблеме синтеза систем автоматического управления для электромеханических объектов, обеспечивающих необходимые статические и динамические показатели качества функционирования, посвящено большое количество публикаций [1–19]. В настоящее время наибольшее практическое применение получили подчиненное (каскадное) регулирование и модальное управление [1–5]. При использовании данных методов статическая точность САУ при действии аддитивных возмущающих факторов зависит от коэффициента петлевого усиления, а, значит от быстродействия. При невозможности изменения быстродействия в закон управления вводят интегральную составляющую, обеспечивающую астатизм. Известным ограничением этих методов является возможность синтеза регуляторов только для линейных (линеаризованных) объектов.

В [5] на основе метода модального управления (МУ) предложены процедуры независимого формирования динамических и статических показателей САУ, позволяющие обеспечивать заданную статическую точность при необходимом быстродействии без введения астатизма. Основными недостатками данных процедур является возможность их применения только для линейных объектов.

Мощным инструментом для синтеза САУ нелинейными объектами, применению которого в последнее время посвящено значительное количество публикаций, является метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР) [6]. Его использование позволяет обеспечить высокое качество переходных процессов в системе, однако выполнение требований к статической точности также возможно обеспечить лишь повышением коэффициента петлевого усиления (изменением быстродействия) или введением астатизма. Существенным также является и то, что с ростом порядка математической модели объекта значительно повышается трудоемкость синтеза системы управления.

Данная работа посвящена разработке методики, обеспечивающей возможность независимого формирования динамических и статических показателей САУ нелинейными объектами. Отличие предлагаемого подхода от методики, изложенной в [20] состоит в том, что математическое описание синтезированной САУ в форме Коши продолжает оставаться нелинейным.

В основу методики положена особенность метода АКАР, позволяющая синтезировать замкнутую систему управления нелинейным объектом, обладающую свойствами линейной системы.

**1. Постановка задачи.** Пусть одномерный объект управления (ОУ) описан в пространстве состояний системой уравнений вида:



Особенностью САУ с регуляторами, синтезированными с использованием (1) является то, что их свойства эквивалентны свойствам линейных систем. Это и предполагается использовать в дальнейшем.

Синтез модальных регуляторов (рис. 1) некомпенсационного типа, проводимый с привлечением методов линейной алгебры [3, 4], осуществляется на основе решения полиномиального уравнения вида

$$D(s) = A(s)C(s) + B(s)R(s), \quad (2)$$

где  $A(s) = s^n + a_{n-1}s^{n-1} + \dots + a_1s + a_0$ ,  $B(s) = b_ms^m + b_{m-1}s^{m-1} + \dots + b_1s + b_0$  – полиномы передаточной функции ОУ (далее будут рассматриваться объекты со строго правильными передаточными функциями, т.е.  $n > m$ );  $C(s) = c_ls^l + c_{l-1}s^{l-1} + \dots + c_1s + c_0$ ,  $R(s) = r_k s^k + r_{k-1}s^{k-1} + \dots + r_1s + r_0$  – полиномы передаточной функции регулятора;  $D(s) = s^p + d_{p-1}s^{p-1} + \dots + d_1s + d_0$  – характеристический полином замкнутой системы;  $s$  – комплексная переменная Лапласа,  $n$  – порядок математической модели объекта. Полиномы  $A(s)$  и  $D(s)$  нормированы, т.е. коэффициенты при старшей степени  $s$  равны единице.

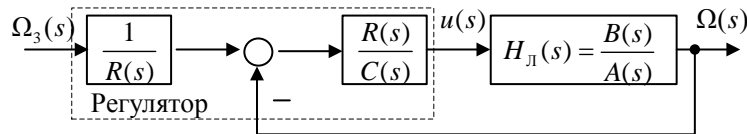


Рис. 1. Структурная схема САУ с полиномиальным регулятором

Среди бесконечного числа решений уравнения (2) обычно интерес представляют, так называемые, минимальные решения двух видов (с минимально возможной степенью полинома  $R(s)$ ), позволяющей изменить весь спектр полинома  $A(s)$ . При выполнении условий

$$\deg R(s) = \deg A(s) - 1, \quad \deg C(s) = \begin{cases} 0, & \text{при } \deg B(s) = 0, \\ \deg B(s) - 1, & \text{при } \deg B(s) > 0 \end{cases} \quad (3)$$

получаются регуляторы дифференцирующего типа, а при выполнении условий

$$\deg R(s) = \deg A(s) - 1, \quad \deg C(s) = \deg R(s) \quad (4)$$

– интегро-дифференцирующего типа.

Однако, приняв в (3), (4)  $\deg R(s) \geq \deg A(s)$  можно получить возможность задавать не только динамические показатели САУ, но и статическую точность [5].

Характеристический полином  $D(s)$  обычно выбирается из числа стандартных полиномов, таких как полиномы Ньютона, Баттерворта, Бесселя и т.п. Также он может быть сформирован, исходя из конкретных требований поставленной задачи.

Основным недостатком данного метода является его применимость для объектов, описываемых линейными математическими моделями.

Таким образом, использование каждого из указанных методов по отдельности, в силу отмеченных особенностей, не позволяет в полной мере использовать их потенциальные возможности.

Поставим задачу разработки методики синтеза, обеспечивающей возможность независимого формирования динамических (быстродействие и характер переходных процессов) показателей и статической точности САУ нелинейными объектами.

**2. Методика синтеза регулятора для независимого обеспечения показателей качества.** Взяв за основу методику, предложенную в [5] для линейных ОУ и приняв во внимание, что использование в процедуре АКАР линейного уравнения

вида (1) обеспечивает замкнутой системе свойства линейной, можно предложить следующую последовательность синтеза нелинейной САУ, обеспечивающую независимое формирование статических и динамических характеристик:

1. Составляются дифференциальные уравнения нелинейного ОУ в форме Коши и соответствующее векторно-матричное описание:

$$s\mathbf{x}(s) = \mathbf{A}\mathbf{x}(s) + \mathbf{B}u(s), \quad \Omega(s) = \mathbf{C}\mathbf{x}(s),$$

где  $\mathbf{x}(s)$ ,  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{C}$ ,  $u(s)$ ,  $\Omega(s)$  – вектор состояния; матрицы динамики, входа и выхода соответствующих размерностей; входной и выходной сигналы.

2. Методом АКАР на основе (1) синтезируется нелинейная САУ. Качество процессов (время переходных процессов, колебательность) замкнутой системы при этом может быть любым.

Следует заметить, что быстродействие САУ на данном этапе не следует выбирать выше, чем требуется в техническом задании, поскольку последующий этап синтеза полиномиального регулятора приведет к необходимости замедления процессов в системе и получению в качестве регулятора неустойчивых или неминимально-фазовых звеньев [5], что негативно скажется на параметрической грубости САУ.

Основная задача данного этапа – получение САУ, обладающей свойствами линейной.

3. Для полученной линейной САУ (рис. 1) определяется передаточная функция  $H_{\text{л}}(s) = \frac{\Omega(s)}{u(s)}$  между управляемой и управляющей координатами. Она может

быть получена двумя способами:

– из векторно-матричного описания полученной САУ, если описание станет линейным (что на практике может быть совершенно неочевидно)

$$H_{\text{л}}(s) = \frac{\Omega(s)}{u(s)} = \mathbf{C}(\mathbf{I}s - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{B},$$

– по выражению

$$H_{\text{л}}(s) = \frac{\Omega(s)}{u(s)} = \frac{T_1 T_2 \dots T_n}{(s + T_1)(s + T_2) \dots (s + T_n)},$$

где  $T_i$  – параметры уравнения (1).

4. Записывается уравнение синтеза полиномиального регулятора (2).

Степень полинома  $R(s)$  передаточной функции регулятора  $H_{\text{р}}(s) = \frac{R(s)}{C(s)}$

выбирается следующим образом:  $\deg R(s) = \deg A(s)$ . Выбор степени полинома  $R(s)$  приводит при решении уравнения синтеза (2) к неопределенной совместной (разрешимой) системе уравнений. Степень полинома  $C(s)$  может быть выбрана любой (3), (4).

5. Выбором соответствующего значения отношения  $r_0 / c_0$  (рис. 2), а, следовательно, и коэффициента усиления в контуре замкнутой системы, обеспечивают необходимую точность системы в статике.

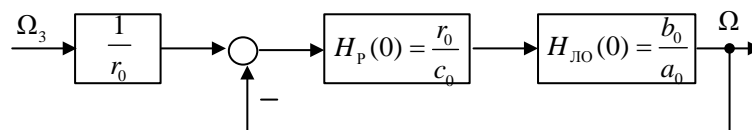


Рис. 2. К влиянию соотношения  $r_0 / c_0$  на статическую ошибку

**Пример.** Проиллюстрируем применение методики обеспечения заданных динамических и статических показателей на модели типового нелинейного электромеханического объекта – электродвигателя постоянного тока последовательного возбуждения [1] (рис. 3), где  $R_{ЯС}$  – суммарное сопротивление якорной обмотки, обмотки возбуждения и добавочных полюсов, Ом;  $L_{ЯС}$  – суммарная индуктивность обмоток якоря и возбуждения, Гн;  $J$  – момент инерции, кгм<sup>2</sup>;  $U_{ВХ}$  – входное напряжение, В;  $i_{Я}$  – ток якоря, А;  $\Omega$  – частота вращения вала, рад/с;  $M_C$  – момент нагрузки, Нм.

Данная модель не учитывает влияние вихревых токов, наводящихся в полюсах и станине при быстром изменении потока.

Изменение магнитного потока в зависимости от тока, протекающего через обмотку, аналитически описано функцией  $\Phi(i_{Я}) = K_2 \arctg(K_1 i_{Я})$  [21], где  $K_1$  – коэффициент масштабирования по току, 1/А;  $K_2$  – коэффициент масштабирования по магнитному потоку, Вб;  $K$  – конструктивная постоянная электродвигателя.

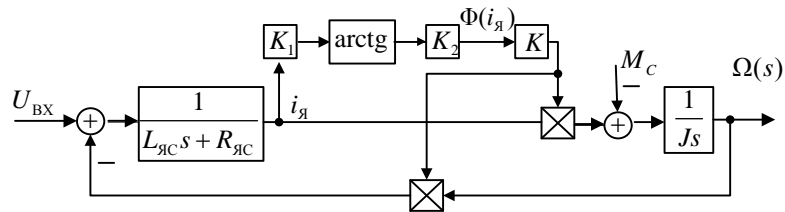


Рис. 3. Модель двигателя последовательного возбуждения без учета вихревых токов

**Пункт 1.** Дифференциальные уравнения модели двигателя последовательного возбуждения в пространстве состояний, при условии, что  $M_C$  не измеряется имеют вид:

$$\begin{cases} \frac{di_{Я}}{dt} = -\frac{R_{ЯС}}{L_{ЯС}} i_{Я} - \frac{K_2 K}{L_{ЯС}} \arctg(K_1 i_{Я}) \omega + \frac{1}{L_{ЯС}} U_{ВХ}, \\ \frac{d\Omega}{dt} = \frac{K_2 K}{J} \arctg(K_1 i_{Я}) i_{Я}. \end{cases}$$

**Пункт 2.** С помощью метода АКАР синтезируем регулятор для ОУ на рис. 1. В качестве технологического инварианта примем стабилизацию скорости вращения на заданном уровне  $\Delta\Omega = \Omega - \Omega_3$  и соответственно введем инвариантное многообразие  $\Psi_1 = \Omega - \Omega_3$ .

Решив основное уравнение АКАР

$$\frac{d\Psi_1}{dt} + T_1 \Psi_1 = 0, \quad (T_1 > 0), \quad (5)$$

введя макропеременную  $\Psi_2 = \frac{K_2 K}{J} \arctg(K_1 i_{Я}) i_{Я} + T_1 \Omega - T_1 \Omega_3 = 0$  и далее решив уравнение

$$\frac{d\Psi_2}{dt} + T_2 \Psi_2 = 0, \quad (T_2 > 0), \quad (6)$$

получим обобщенный закон управления

$$U_{ВХ} = K_2 K \arctg(K_1 i_{Я}) \omega + K_{11}(i_{Я}) i_{Я} - K_{12}(i_{Я}) \Omega + P(i_{Я}) \Omega_3,$$

где

$$K_{11}(i_{я}) = R_{яС} - L_{яС}(T_1 + T_2) \frac{\text{arctg}(K_1 i_{я})}{\frac{K_1 i_{я}}{1 + (K_1 i_{я})^2} + \text{arctg}(K_1 i_{я})},$$

$$K_{12}(i_{я}) = P(i_{я}) = T_1 T_2 \frac{J L_{яС}}{K_2} \frac{1}{\frac{K_1 i_{я}}{1 + (K_1 i_{я})^2} + \text{arctg}(K_1 i_{я})}.$$

Переменные  $T_1, T_2$  выбираются исходя из желаемого темпа переходных процессов.

Схема замкнутой САУ, синтезированной по методу АКАР, приведена на рис. 4. Оценим ее возможности в управлении электродвигателем постоянного тока последовательного возбуждения с параметрами

$$R_{яС} = 0,7 \text{ Ом}, L_{яС} = 0,11 \text{ Гн}, J = 2,1 \text{ кг*м}^2, K_1 = 0,05 \text{ 1/А}, K_2 = 1,5 \text{ Вб}. \quad (7)$$

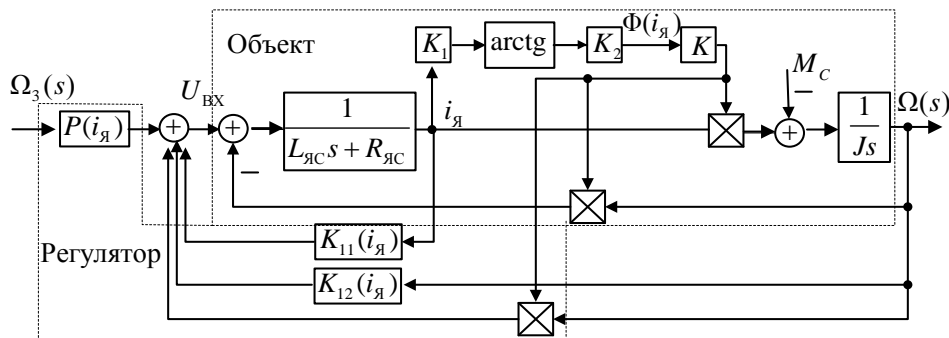


Рис. 4. Замкнутая САУ, синтезированная по методу АКАР

Пусть требуется обеспечить аperiodический переходный процесс с временем установления 2,4 с по управлению и статическую ошибку не более 10 рад/с при постоянном моменте нагрузки  $M_C = 40$  Нм.

Заданный переходный процесс САУ с временем установления 2,4 с обеспечивается при  $T_1 = T_2 = 2$  с. Статическая ошибка при постоянном моменте нагрузки  $M_C = 40$  Нм, приложенном в момент времени  $t = 5$  с составляет 19 рад/с, что почти в 2 раза превышает заданную (рис. 5, кривая 2).

При использовании синтезированного управляющего устройства заданная статическая ошибка (10 рад/с) САУ при постоянном моменте нагрузки  $M_C = 40$  Нм обеспечивается выбором  $T_1 = T_2 = 4$  с. Однако время переходного процесса при этом составляет 1,2 с, т.е. быстродействие в 2 раза выше заданного (рис. 5, кривая 1), что может быть недопустимо, например, по соображениям энергетики.

Введение интегральной составляющей в закон управления потребует решения трех уравнений вида (5), (6), что приведет, очевидно, к заметному увеличению вычислительных трудностей и усложнению управляющего устройства.

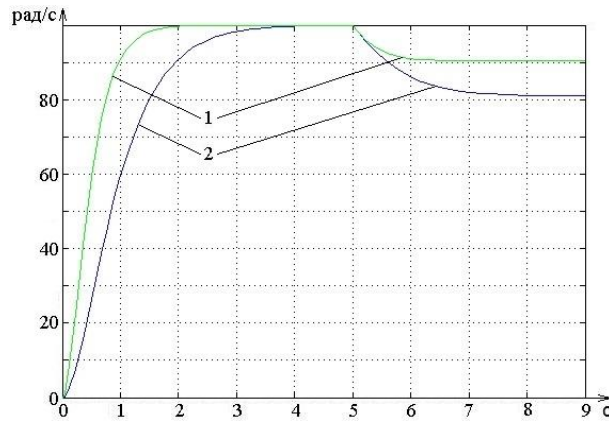


Рис. 5. Графики переходных процессов: 1 – замкнутая САУ с желаемой статической ошибкой, синтезированная по методу АКАР при  $T_1 = T_2 = 4$  с, 2 – замкнутая САУ с желаемым быстродействием, синтезированная по методу АКАР при  $T_1 = T_2 = 2$  с

**Пункт 3.** Уравнения замкнутой САУ (рис. 2) в пространстве состояний

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{di_{Я}}{dt} &= -(T_1 + T_2) \frac{\arctg(K_1 i_{Я})}{\frac{K_1 i_{Я}}{1 + (K_1 i_{Я})^2} + \arctg(K_1 i_{Я})} i_{Я} - \frac{T_1 T_2 J}{K_2} \frac{1}{\frac{K_1 i_{Я}}{1 + (K_1 i_{Я})^2} + \arctg(K_1 i_{Я})} \Omega + \\ &+ \frac{T_1 T_2 J}{K_2} \frac{1}{\frac{K_1 i_{Я}}{1 + (K_1 i_{Я})^2} + \arctg(K_1 i_{Я})} \Omega_0, \\ \frac{d\Omega}{dt} &= \frac{K_2}{J} \arctg(K_1 i_{Я}) i_{Я}, \end{aligned} \right.$$

являются нелинейными, но в силу (5), (6) соответствуют линейному объекту с ПФ

$$H_{\text{ЛЮ}}(s) = \frac{T_1 T_2}{s^2 + (T_1 + T_2)s + T_1 T_2},$$

в чем можно убедиться моделированием.

Это позволяет независимо формировать статические и динамические показатели САУ введением технически реализуемого (имеющего правильную ПФ) полиномиального регулятора [5] со степенями полиномов  $R(s)$  и  $C(s)$ , равными степени полинома  $A(s)$ .

Расчет регулятора осуществляется по уравнению (2), где

$$A(s) = s^2 + (T_1 + T_2)s + T_1 T_2, \quad B(s) = T_1 T_2, \quad R(s) = r_2 s^2 + r_1 s + r_0, \quad C(s) = s^2 + c_1 s + c_0, \\ D(s) = s^4 + 4\Omega_0 s^3 + 6\Omega_0^2 s^2 + 4\Omega_0^3 s + \Omega_0^4.$$

Параметр  $\Omega_0$  и коэффициенты полинома  $D(s)$  выбираются, исходя из заданного темпа и качества переходных процессов САУ соответственно.

Для нахождения коэффициентов полиномов  $R(s)$  и  $C(s)$  необходимо решить систему



$$\begin{cases} T_1 T_2 c_0 + T_1 T_2 r_0 = \Omega_0^4, \\ (T_1 + T_2)c_0 + T_1 T_2 c_1 + T_1 T_2 r_1 = 4\Omega_0^3, \\ c_0 + (T_1 + T_2)c_1 + T_1 T_2 + T_1 T_2 r_2 = 6\Omega_0^2, \\ c_1 + T_1 + T_2 = 4\Omega_0, \end{cases} \quad (8)$$

составленную из коэффициентов при равных степенях  $s$  уравнения (2).

В (8) 4 уравнения и 5 неизвестных, поэтому соотношение  $\frac{r_0}{c_0} = k$  – коэффициент

усиления регулятора, может быть задано так, чтобы обеспечить необходимый коэффициент усиления замкнутой системы (рис. 4, 5) и, соответственно, статическую ошибку при неизменных динамических показателях.

В результате решения (6) получаем следующие выражения для коэффициентов полиномов  $R(s)$  и  $C(s)$ :

$$\begin{aligned} r_0 = k c_0, \quad r_1 &= -\frac{T_1 + T_2}{(T_1 T_2)^2 (1+k)} \Omega_0^4 + \frac{4}{T_1 T_2} \Omega_0^3 - 4\Omega_0 + T_1 + T_2, \\ r_2 &= -\frac{1}{(T_1 T_2)^2 (1+k)} \Omega_0^4 + \frac{6}{T_1 T_2} \Omega_0^2 - 4\frac{T_1 + T_2}{T_1 T_2} \Omega_0 + \frac{(T_1 + T_2)^2}{T_1 T_2} - 1, \\ c_0 &= \frac{\Omega_0^4}{T_1 T_2 (1+k)}, \quad c_1 = 4\Omega_0 - T_1 - T_2. \end{aligned}$$

Полученные результаты проверим с помощью моделирования для параметров (7) при  $M_C = 40$  Нм,  $T_1 = T_2 = 2$  с,  $\Omega_0 = 3,3$  с<sup>-1</sup>.

Численные значения коэффициентов полиномов:

1. Для  $k = r_0 / c_0 = 0,3$ :  $R(s) = 0,43s^2 + 3,93s + 6,84$ ,  $C(s) = s^2 + 9,2s + 22,81$ .

2. Для  $k = r_0 / c_0 = 1$ :  $R(s) = 2,43s^2 + 11,91s + 14,82$ ,  $C(s) = s^2 + 9,2s + 14,82$ .

Результаты моделирования показаны на рис. 6.

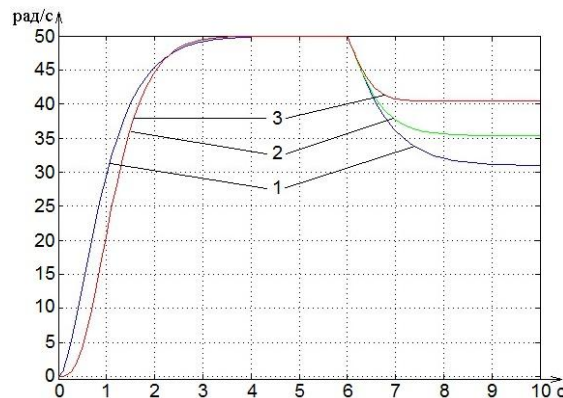


Рис. 6. Графики переходных процессов: 1 – замкнутая САУ, синтезированная по методу АКАР при  $T_1 = T_2 = 2$  с, 2 – САУ с полиномиальным регулятором для  $r_0 / c_0 = 0,3$ , 3 – САУ с полиномиальным регулятором для  $r_0 / c_0 = 1$

Кривая 3 по динамическим и статическим показателям удовлетворяет требованиям технического задания. Следует отметить, что дальнейшее увеличение отношения  $\tau_0 / c_0$  приведет к уменьшению статической ошибки без изменения динамики основного процесса, т.е. энергетические показатели САУ по управлению также останутся неизменными.

**Заключение.** Обеспечение требуемых показателей качества САУ всегда являлось одной из основных задач синтеза. В рамках теории управления линейными объектами эта задача достаточно хорошо проработана и имеет множество решений в рамках различных методических и структурных подходов.

Комплексное применение методов АКАР и модального управления позволило предложить методику формирования статических и динамических характеристик нелинейных объектов, имеющих в своем составе аналитические нелинейности, или нелинейности, аппроксимируемые аналитическими зависимостями.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Ключев В.И.* Теория электропривода: Учеб. для вузов. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.
2. *Кузовков Н.Т.* Модальное управление и наблюдающие устройства. – М.: Машиностроение, 1976 – 184 с.
3. *Волгин Л.Н.* Оптимальное дискретное управление динамическими системами / Под ред. П.Д. Крутько. – М.: Наука, 1986. – 340 с.
4. *Гайдук А.Р.* Теория и методы аналитического синтеза систем автоматического управления (полиномиальный подход). – М.: Физматлит, 2012. – 360 с.
5. *Тютиков В.В., Тарарыкин С.В.* Робастное модальное управление технологическими объектами. – Иваново: ИГЭУ, 2006. – 256 с.
6. *Колесников А. А.* Синергетическая теория управления. – Таганрог: ТРТУ. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 344 с.
7. *Филаретов В.Ф., Дыда А.А., Очкал В.С.* Адаптивные системы с переменной структурой для управления электроприводами роботов // Автоматизированный электропривод. 1990. – С. 160-155.
8. *Акимов Л.В., Долбня В.Т., Клепиков В.Б., Пирожок А.В.* Синтез упрощенных структур двухмассовых электроприводов с нелинейной нагрузкой / Под общ. ред. В.Б. Клепикова. – Харьков: НТУ «ХПИ», Запорожье: ЗНТУ, 2002. – 160 с.
9. *Поляк Б.Т., Щербаков П.С.* Трудные задачи линейной теории управления. Некоторые подходы к решению // Автоматика и телемеханика. – 2005. – № 5. – С. 7-46.
10. *Мееров М.В.* Синтез структур систем автоматического регулирования высокой точности. – М.: Наука, 1967. – 424 с.
11. *Востриков А.С.* Синтез нелинейных систем методом локализации. – Новосибирск: Изд-во Новосиб. ун-та, 1990. – 120 с.
12. *Поляк Б.Т., Щербаков П.С.* Робастная устойчивость и управление. – М.: Наука, 2002. – 303 с.
13. *Chen C.-T.* Linear system theory and design, Holt, Rinehart and Winstone, N.Y., 1984.
14. *Moore B.C.* Principal Component Analysis in Linear Systems: Controllability, Observability, and Model Reduction // IEEE Trans. Automat. Control, AC-26. – 1981. – P. 17-32.
15. *Goodwin G.C., Graebe S.F., Salgaou M.E.* Control system design, Valparaiso, Chile, 2000.
16. *Francis B.A.* The linear multivariable regulator problem // SIAM J. Conrol Optim. – 1977. – Vol. 15, No. 3. – P. 486–505.
17. *Дорф Р., Бишон Р.* Современные системы управления, Лаб. базовых знаний. – М., 2002.
18. *Wang J., Duan Z., Yang Y., Huang L.* Analysis and Control of Nonlinear Systems with Stationary Sets: Time-Domain and Frequency-Domain Methods, World Scientific Publishing Company, 2009.
19. *Xin M., Balakrisnan S.N.* Missile longitudinal autopilot design using a new suboptimal nonlinear control method // IEE Proc. Control Theory Appl., 150:6. – 2003. – P. 577-584.
20. *Тютиков В.В., Воронин А.И.* Независимое формирование статических и динамических показателей нелинейных объектов // Вестник ИГЭУ. – 2014. – № 2. – С. 41-44.

21. Матюк В.Ф., Осипов А.А. Математические модели кривой намагничивания и петель магнитного гистерезиса. Ч. 1. Анализ моделей // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2011. – № 2. – С. 3-35.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.М. Белевцев.

**Тютиков Владимир Валентинович** – ИГЭУ; e-mail: tvv@ispu.ru; 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34; тел.: 84832385775; проректор по ИР; д.т.н.; профессор.

**Воронин Артем Игоревич** – e-mail: met@upm.ispu.ru; кафедра электроники и микропроцессорных систем; инженер.

**Tyutikov Vladimir Valentinovich** – Ivanovo State Power University; e-mail: tvv@ispu.ru; 34, Rabfakovskaya street, Ivanovo, 153003, Russia; phone: +74832385775; vice-rector on scientific work; dr. of eng. sc.

**Voronin Artem Igorevich** – e-mail: met@upm.ispu.ru; the department of electronics and microprocessor systems; engineer.

УДК 004.896:004.853:519.876.5

**Р.В. Сапрыкин**

#### **АЛГОРИТМЫ ИНФОРМАЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ ПРИ КАРТОГРАФИРОВАНИИ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ\***

*Актуальность научно-исследовательских работ подобной тематики определяется ростом востребованности в интеллектуальных мобильных роботах (ИМР), способных самостоятельно решать широкий круг задач, важной частью которых является планирование своих перемещений в неизвестной или частично неизвестной внешней среде. Основные области применения таких ИМР связаны с ограждением человека от «не дружелюбной» среды: космические и подводные исследования, мониторинг техногенных и природных ЧС и т.д. Применение бионического подхода для построения систем планирования таких ИМР, позволяет обеспечить достаточную надежность и эффективность при незначительной сложности реализации. Научно-техническая новизна заключается в повышении эффективности и расширении возможностей бионического метода построения нейросетевых планировщиков перемещений за счет использования алгоритмов информационного обмена группы ИМР картографической информацией и данными о свойствах проходимости отдельных участков среды. Рассмотрены различные алгоритмы, а также их комбинации, обеспечивающие расширение возможностей и устранение ограничений, накладываемых конечностью зоны восприятия сенсорной подсистемы ИМР, а также повышение адекватности построения модели внешней среды за счет дополнительной информации о положении и свойствах отдельных участков-препятствий внешней среды функционирования ИМР. При этом показаны структурные схемы и особенности программной реализации различных вариантов информационного взаимодействия ИМР в группе. Также проведено компьютерное моделирование предложенных алгоритмов на базе специально разработанных инструментальных средств, позволяющих оперативно изменять начальные условия проведения экспериментов, отслеживать и настраивать различные параметры исследуемых алгоритмов. При этом средства моделирования предоставляют удобный пользовательский интерфейс и наглядное трехмерное отображение процесса моделирования.*

*Интеллектуальный мобильный робот; картографирование; бионическая система планирования; самообучение; информационное взаимодействие.*

\* Работа финансово поддержана РФФИ в рамках гранта № 14-19-01533.