

## Раздел VI. Автоматизация и управление

УДК 519.71

DOI 10.23683/2311-3103-2017-6-266-279

А.Р. Гайдук, М.Ю. Медведев, Е.А. Плаксиенко

### АНАЛИТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ\*

*В настоящее время известны различные методы синтеза систем автоматического управления, однако большинство из них являются итерационными. Вследствие этого синтез систем управления с необходимыми показателями качества сопровождается значительными затратами времени. Целью доклада является представления метода аналитического синтеза систем с управлением по выходу и воздействиям, который позволяет преодолеть указанную трудность. Синтезируемая система имеет частично заданную структуру, желаемые показатели качества, пониженную размерность и повышенную робастность. Параметры устройства управления находятся путем решения систем линейных алгебраических уравнений. Для обеспечения желаемых показателей качества таких как: порядки астатизма к задающему воздействию и возмущениям; перерегулирование, длительность переходного процесса и малая колебательность используются стандартные передаточные функции. Приводятся условия разрешимости задачи аналитического синтеза систем автоматического управления, с желаемыми передаточными функциями. Эти функции формируются в соответствии с требуемыми показателями качества синтезируемой системы автоматического управления. Повышение робастности достигается путем включением части полюсов и нулей объекта управления в число корней характеристического полинома замкнутой системы автоматического управления. Предложенный метод аналитического синтеза может применяться и при создании многомерных систем управления техническими объектами, в том числе и подвижными объектами. Эффективность метода аналитического синтеза систем автоматического управления техническими объектами показана на численных примерах. Предложенный метод может использоваться при создании систем менее сложных, но более робастных для объектов химической, текстильной, пищевой и других отраслей производства, а также при создании систем специального назначения.*

*Объект; система управления; синтез; стандартные передаточные функции; технический объект; качество; астатизм; инвариантность; редукция; робастность.*

A.R. Gaiduk, M.Yu. Medvedev, E.A. Plaksienko

### ANALYTICAL DESIGN OF AUTOMATION CONTROL SYSTEMS

*Now there are many methods of automatic control systems design, however the majority of them are iterative. As a consequence, design of control systems with necessary performances is accompanied by significant expenses of time. The purpose of this report is to represent the method of analytical design of automation systems with control on output and impacts which allows overcoming the specified difficulty. The designed system has partially given structure, desirable performance, lowered dimension and increased robustness. Parameters of a controller are the solutions of the linear algebraic equations systems. Standard transfer functions are used for maintenance of the desirable quality parameters such as: the astatic orders to reference input and external disturbances; overshoot and time response. The resolvability conditions of the task of the analytical design of automatic control systems, with desirable transfer functions are resulted. These*

\* Статья подготовлена в рамках выполнения в ЮФУ работ по гранту РФФИ, проект № 16-08-00013-А

*functions are formed according to the required designed automatic control system quality. Increase of robustness is achieved by inclusion of a part of its poles and zeros into the roots of the closed system characteristic polynomial of the automation control systems. The suggested method of analytical design can be applied for creation of the multivariable control systems by technical and moving plants. Efficiency of the analytical design method of the control automation systems are shown on the numerical examples. These methods can be used for creation of the automation control systems with less complex, but more robust for plants of chemical, textile, food and other branches of production and also at creation of systems of special assignment.*

*Plant; control system; design; standard transfer functions; technical plant; performance; astatic; invariant; reduction; robustness.*

**Введение.** Область применения систем автоматического управления (САУ) в настоящее время является очень широкой [1–5]. Поэтому они должны создаваться с минимальными затратами ручного труда, так как он является наименее эффективным. В связи с этим системы автоматизированного проектирования являются наиболее эффективным путем создания качественных САУ [1, 5]. Создание таких систем требует разработки аналитических методов синтеза, в особенности, систем с заданными прямыми показателями качества в переходном и установившемся режиме, которые наиболее полно отражают инженерные требования к САУ. В настоящее время простые законы управления П, ПИ, ПД и др. применяются чаще всего [6]. Обычно эти законы выбираются априори, но качество получаемых САУ не всегда соответствует требованиям из-за ограниченных возможностей этих законов. Кроме того, эти простые законы управления не позволяют использовать возможности современных компьютерных технологий в полной мере.

Методы оптимального управления с применением фильтра Калмана-Бьюси (LQG) требуют формирования квадратичного функционала, коэффициенты которого весьма неопределенным образом связаны с прямыми показателями качества. Это обусловлено тем, что методы оптимального управления изначально ориентированы на косвенные методы оценки качества систем управления [7, 8]. Метод модального управления также относится к аналитическим [9, 10]. Его параметры могут быть найдены или по формуле Аккермана, или путем преобразования модели системы к каноническим формам [9, 11]. Однако модальное управление позволяет изменять только полюсы объекта, оставляя неизменными его нули передачи, поэтому обеспечение требуемых значений прямых показателей качества методами как оптимального, так и модального управления возможно лишь итеративным путем. Часто число итераций оказываются довольно большим, что приводит к большим затратам времени на создание эффективных систем с модальным управлением.

В докладе рассматривается относительно новый метод аналитического синтеза систем управления с частично заданной структурой. Этот метод ориентирован на контроллеры, которые реализуют новый принцип управления: «управление по выходу и воздействиям» [11–15]. Этот принцип отличается от часто используемого «принципа управления по отклонению» тем, что задающее воздействие и выходная управляемая переменная подвергаются обработке в контроллере в соответствии с разными операторами. Поэтому, если даже объект управления является одномерным и полным, то контроллер, реализующий управление по выходу и воздействиям, в общем случае, имеет несколько входов, а замкнутая САУ является неполной. Контроллеры, реализующие управление по выходу и воздействиям, несколько сложнее, чем контроллеры по отклонению. Но они позволяют осуществить достаточно независимое управление полюсами и нулями замкнутой системы и обеспечить желаемые значения показателей качества в переходном и в установившемся режиме. Управление выходу и воздействиям также позволяет учесть условия физической реализуемости контроллера в процессе синтеза. С другой стороны, это управление способствует более полному использованию возможностей современных компьютерных технологий при решении задач управления. Параметры контроллера по выходу и воздействиям определяются аналитически, т.е. путем решения линейных систем алгебраических уравнений [12, 14].

Рассматриваемый метод аналитического синтеза систем с управлением по выходу и воздействиям (АССУВВ) позволяет обеспечить такие желаемые показатели качества как: порядки астатизма к задающему воздействию и внешним возмущениям; перегулирование, длительность переходного процесса и малую колебательность [11, 14, 15].

На практике коэффициенты модели объекта обычно известны не точно. Поэтому системы управления должны обладать свойством робастной устойчивости, которое обычно снижается с увеличением порядка системы [9–11]. Поэтому для повышения робастной устойчивости замкнутых систем управления предлагается применять редуцированные системы управления. Одним из методов редукиции является включение части полюсов и нулей объекта управления в число корней характеристического полинома замкнутой системы.

В совокупности с методом динамической декомпозиции метод АССУВВ может применяться и для управления многомерными объектами и автономными роботами. Эффективность метода аналитического синтеза систем управления иллюстрируется численными примерами.

**1. Постановка задачи аналитического синтеза СУ.** Для большей ясности предполагается, что на объект управления (ОУ, рис. 1) действуют одно измеряемое и одно неизмеряемое возмущение, а его уравнения в векторно-матричной форме имеют вид:

$$\dot{x} = Ax + b_0 u + b_1 f_1 + b_2 f_2, \quad (1)$$

$$y = c^T x + \beta_0 u + \beta_1 f_1 + \beta_2 f_2. \quad (2)$$

Здесь  $x = [x_1 \dots x_n]^T$  –  $n$ -вектор переменных состояния;  $f_1 = f_1(t)$  и  $f_2 = f_2(t)$  – доступное и недоступное измерению возмущения;  $A, b_0, b_1, b_2, c$  – постоянные числовые матрица и векторы соответствующих размерностей;  $\beta_0, \beta_1, \beta_2$  – числа;  $T$  – символ транспонирования [8, 11, 14, 15].

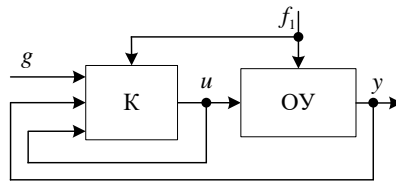


Рис. 1. Схема системы с управлением по выходу и воздействиям

Уравнения контроллера (К) (рис. 1), формирующего управление по выходу и воздействиям, записываются следующим образом:

$$\dot{z} = Rz + q_0 g - du - ly + q_1 f_1, \quad (3)$$

$$u = k^T z + \vartheta_0 g - \theta u - \lambda y + \vartheta_1 f_1. \quad (4)$$

Здесь  $z$  –  $r$ -вектор состояния;  $g$  – задающее воздействие;  $f_1$  – измеряемое возмущение;  $R, q_0, d, l, q_1, k$  – постоянные матрица и векторы, а  $\vartheta_0, \theta, \lambda$  и  $\vartheta_1$  – коэффициенты.

Уравнения замкнутой системы при  $\gamma_0^{-1} = 1 + \theta + \lambda \beta_0 \neq 0$  имеют вид

$$\dot{w} = Dw + h_0 g + h_1 f_1 + h_2 f_2, \quad (5)$$

$$y = a^T w + \eta_0 g + \eta_1 f_1 + \eta_2 f_2, \quad (6)$$

где  $w$  – вектор состояния размерности  $n_{\text{сис}}$ . Матрица  $D$ , векторы  $h_0, h_1, h_2, a$  и числа  $\eta_0, \eta_1, \eta_2$  – определяются равенствами:

$$\begin{aligned}
 D &= \begin{bmatrix} A - b_0 \gamma_0 \lambda c^T & b_0 \gamma_0 k^T \\ [d \gamma_0 \lambda - l(1 - \beta_0 \gamma_0 \lambda)] c^T & R - (d + l \beta_0) \vartheta_0 \gamma_0 \end{bmatrix}; \quad h_0 = \begin{bmatrix} b_0 \vartheta_0 \gamma_0 \\ q_0 - (d + l \beta_0) \vartheta_0 \gamma_0 \end{bmatrix}, \\
 h_1 &= \begin{bmatrix} b_1 + b_0 \gamma_0 (\vartheta_1 - \lambda \beta_1) \\ q_1 - l \beta_1 - (d + l \beta_0) \gamma_0 (\vartheta_1 - \lambda \beta_1) \end{bmatrix} \quad h_2 = \begin{bmatrix} b_2 + b_0 \gamma_0 \lambda \beta_2 \\ [(d + l \beta_0) \gamma_0 \lambda - l] \beta_2 \end{bmatrix}, \\
 a^T &= \begin{bmatrix} (1 - \beta_0 \gamma_0 \lambda) c^T & \beta_0 \gamma_0 k^T \end{bmatrix}, \quad \eta_0 = \beta_0 \gamma_0 \vartheta_0, \\
 \eta_1 &= \beta_1 + \beta_0 \gamma_0 (\vartheta_1 - \lambda \beta_1), \quad \eta_2 = \beta_2 (1 - \beta_0 \gamma_0 \lambda), \\
 n_{\text{сис}} &= n + r.
 \end{aligned} \tag{7}$$

Параметры замкнутой системы управления (5), (6), объекта и контроллера содержатся в выражениях (7), поэтому эти выражения можно использовать для определения структуры и параметров контроллера [3, 7]. В этом случае при решении задачи синтеза необходимо формировать матрицы и векторы из уравнений (5), (6). Однако, желаемый вид этих матриц и векторов трудно обосновать. Кроме того, решение задачи синтеза в виде уравнений (3), (4) является неединственным, так как многие эквивалентные системы могут описываться этими уравнениями.

С целью сужения множества решений задачи синтеза, целесообразно перейти к уравнениям «вход-выход». Уравнения «вход-выход» ОУ, контроллера и замкнутой системы в операторной форме имеют вид:

$$A(p)y = B_0(p)u + B_1(p)f_1 + B_2(p)f_2, \tag{9}$$

$$\bar{R}(p)u = Q_0(p)g - L(p)y + Q_1(p)f_1, \tag{10}$$

$$D(p)y = H_0(p)g + H_1(p)f_1 + H_2(p)f_2, \tag{11}$$

где  $p = d/dt$  – оператор дифференцирования. Полиномы в уравнениях (9)–(11) определяются из уравнений (1)–(6) хорошо известными соотношениями. Из уравнений (9)–(11) вытекают следующие равенства:

$$D(p) = A(p)\bar{R}(p) + B_0(p)L(p), \tag{12}$$

$$H_0(p) = B_0(p)Q_0(p), \tag{13}$$

$$H_1(p) = B_0(p)Q_1(p) + B_1(p)\bar{R}(p), \tag{14}$$

$$H_2(p) = B_2(p)\bar{R}(p). \tag{15}$$

Эти выражения содержат, с одной стороны, полиномы  $D(p)$ ,  $H_j(p)$  замкнутой системы, а с другой – полиномы  $A(p)$ ,  $B(p)$  и  $B_i(p)$  объекта управления и полиномы  $\bar{R}(p)$ ,  $N(p)$ ,  $L(p)$  и  $Q_j(p)$  – контроллера. После замены в равенствах (12)–(15) полиномов  $D(p)$ ,  $H_j(p)$  на желаемые полиномы  $D^*(p)$ ,  $H_j^*(p)$ , эти выражения становятся **разрешающими уравнениями** задачи аналитического синтеза линейной САУ с частично заданной структурой. Известными в этих уравнениях будут полиномы  $A(p)$  и  $B_j(p)$ , так как объект задан, а также полиномы  $D^*(p)$ ,  $H_j^*(p)$ , поскольку они являются знаменателями и числителями желаемых передаточных функций:

$$W_{y_g}^*(p) = \frac{H_0^*(p)}{D^*(p)}, \quad W_{y_{f_j}}^*(p) = \frac{H_j^*(p)}{D^*(p)}, \quad j = 1, 2, \tag{16}$$

которые могут быть назначены, исходя из требований к качеству замкнутой системы управления [14].

Другими словами, выражения (11)–(14) являются уравнениями относительно полиномов  $R(p)$ ,  $N(p)$ ,  $L(p)$  и  $Q_j(p)$ , которые определяют искомого уравнение «вход-выход» контроллера. Найденное уравнение контроллера (10) реализуется в виде динамического блока с одним выходом и несколькими входами (см. рис. 1). Это очень важный момент, поскольку, в противном случае порядок полученного контроллера будет равен не  $r$ , а  $3r$ , т.е. намного выше. Соотношения (12)–(15) эквивалентны системам линейных алгебраических уравнений, что и обеспечивает аналитический характер рассматриваемого метода синтеза СУ. В частности, уравнениям (12) и (13) соответствуют следующие системы:

$$\begin{bmatrix} \beta_0 & 0 & 0 & \alpha_0 & 0 & \dots & 0 \\ \beta_1 & \beta_0 & \ddots & \alpha_1 & \alpha_0 & 0 & \vdots \\ \vdots & \beta_1 & \ddots & \vdots & \alpha_1 & \ddots & 0 \\ \beta_{m_0} & \vdots & \ddots & \alpha_n & \vdots & \ddots & \alpha_0 \\ 0 & \beta_{m_0} & \ddots & 0 & \alpha_n & \ddots & \alpha_1 \\ \vdots & 0 & \ddots & \vdots & 0 & \ddots & \vdots \\ 0 & \vdots & & 0 & \vdots & \ddots & \alpha_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_0 \\ \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_{r_L} \\ \rho_0 \\ \vdots \\ \rho_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_0^* \\ \delta_1^* \\ \delta_2^* \\ \vdots \\ \delta_{n_{\text{сис}}-1}^* \\ \delta_{n_{\text{сис}}}^* \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \beta_0 & 0 & 0 \\ \beta_1 & \beta_0 & 0 \\ \vdots & \beta_1 & \ddots \\ \beta_{m_0} & \vdots & \ddots \\ 0 & \beta_{m_0} & \ddots \\ \vdots & \vdots & \beta_{m_0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vartheta_{00} \\ \vartheta_{01} \\ \vdots \\ \vartheta_{0r_0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \eta_{00}^* \\ \eta_{01}^* \\ \vdots \\ \eta_{0m_{\text{сис}0}}^* \end{bmatrix}.$$

Линейность систем алгебраических уравнений, эквивалентных соотношениям (12)–(15), является важнейшей особенностью данного подхода. Условия, при которых эти алгебраические системы имеют решения относительно полиномов контроллера (9), являются условиями разрешимости задачи аналитического синтеза СУ. Они учитывают условия физической реализуемости контроллера (9) следующего вида:

$$\mu_{yy} \geq \mu_{yy}^*, \tag{17}$$

где  $\mu_{yy}$  – относительный порядок контроллера, определяемый равенством

$$\mu_{yy} = \min \{ r - r_L, r - r_N, r - r_j \mid j = 0, 1 \}, \tag{18}$$

$\mu_{yy}^*$  – допустимое по условиям реализуемости значение относительного порядка контроллера;  $r = \deg R(p)$ ,  $r_L = \deg L(p)$ ,  $r_N = \deg N(p)$ ,  $r_j = \deg Q_j(p)$ .

На практике чаще всего принимается  $\mu_{yy}^* = 0$  или  $\mu_{yy}^* \geq 1$ . В первом случае контроллер может иметь прямые безынерционные каналы вход-выход. Во втором случае такие каналы не допускаются. Постоянная

$$\mu_{\text{сис}} = n_{\text{сис}} - \deg H_0^*(p) \tag{19}$$

называется относительным порядком системы (11).

Итак, для решения задачи аналитического синтеза системы управления, прежде всего, необходимо сформировать полиномы  $D^*(p)$  и  $H_j^*(p)$  при которых замкнутая система с частично заданной структурой имеет заданные показатели качества, а уравнение соответствующего контроллера удовлетворяет условиям осуществимости. Эта задача имеет решение, если выполняются следующие условия [11, 15]:

- i) все коэффициенты (корни) полинома  $D^*(p)$  и часть коэффициентов полиномов  $H_j^*(p)$ ,  $j = 0, 1, 2$  могут быть назначены в соответствии с желаемыми показателями качества синтезируемой системы с передаточными функциями (15);
- ii) система управления (9), (10) или (11) имеет желаемые показатели качества, если  $D(p) = D^*(p)$  и  $H_j(p) = H_j^*(p)$ ,  $j = 0, 1, 2$ ;

iii) системы уравнений (12)–(15) имеют решение относительно полиномов  $\bar{R}(p)$ ,  $L(p)$ ,  $Q_0(p)$ ,  $Q_1(p)$ ;

iv) полиномы  $\bar{R}(p)$ ,  $L(p)$ ,  $Q_0(p)$ ,  $Q_1(p)$  удовлетворяют условиям (17).

**2. Решение задачи аналитического синтеза САУ.** Рассматриваемый алгоритм синтеза существенно зависит от способа назначения корней характеристического полинома замкнутой системы (далее они называются полюсами). Если полюсы системы назначены без учета свойств объекта, то она называется «системой с независимыми полюсами». Если же полюсы назначены так, что часть из них совпадает (согласованы) с нулями передачи объекта по управлению и (или) с корнями характеристического полинома объекта, то система называется «системой с согласованными полюсами». В данном докладе ограничимся рассмотрением систем с согласованными полюсами, так как в этом случае условия реализуемости передаточных функций наименее жесткие [11, 14].

Так как для устойчивости и желаемого качества замкнутой системы (8), (9) или (10) необходимо, чтобы все корни полинома (11) располагались в некоторой области  $\Omega_{\Pi}$  левой части комплексной плоскости, то обычно проводится факторизация полиномов  $A(p)$  и  $B_0(p)$  из уравнения (8) следующим образом:

$$A(p) = A_{\Omega}(p)A_{\bar{\Omega}}(p), \quad B_0(p) = \beta_{m_0} B_{\Omega}(p)B_{\bar{\Omega}}(p), \quad (20)$$

где  $A_{\Omega}(p)$ ,  $A_{\bar{\Omega}}(p)$  и  $B_{\Omega}(p)$ ,  $B_{\bar{\Omega}}(p)$  – нормированные по старшей степени полиномы;  $\beta_{m_0}$  – коэффициент полинома  $B_0(p)$  при старшей степени  $p$ . Здесь  $A_{\Omega}(p)$  и  $B_{\Omega}(p)$  полиномы, корни которых равны расположенным в области  $\Omega_{\Pi}$  корням полиномов  $A(p)$  и  $B_0(p)$ . Все корни полиномов  $A_{\bar{\Omega}}(p)$  и  $B_{\bar{\Omega}}(p)$  включаются в число корней характеристического полинома замкнутой системы.

В случае систем с согласованными полюсами полиномы из уравнения контроллера (9) берутся в виде:

$$\begin{aligned} \bar{R}(p) &= B_{\Omega}(p)\tilde{R}(p), \quad L(p) = A_{\Omega}(p)\tilde{L}(p), \\ Q_0(p) &= A_{\Omega}(p)M_{\Omega}(p)\tilde{Q}_0(p), \end{aligned} \quad (21)$$

где  $\tilde{R}(p)$ ,  $\tilde{L}(p)$ ,  $\tilde{Q}_0(p)$ ,  $\tilde{M}_{\Omega}(p)$  – вспомогательные полиномы, определяемые в процессе решения задачи синтеза.

Из выражений (10)–(13) и (21) следует, что полиномы  $H_0(p)$  и  $D(p)$  системы (10) с согласованными полюсами и с заданной передаточной функцией  $W_{yg}^*(p) = H_0^*(p)/D^*(p)$ , имеют вид

$$D(p) = A_{\Omega}(p)B_{\Omega}(p)D^*(p)M_{\Omega}(p), \quad (22)$$

$$H_j(p) = A_{\Omega}(p)B_{\Omega}(p)H_j^*(p)M_{\Omega}(p), \quad j = 0, 1, 2. \quad (23)$$

Полиномы  $\tilde{R}(p)$ ,  $\tilde{L}(p)$ ,  $\tilde{Q}_0(p)$  в равенствах (21) определяются решением систем алгебраических уравнений, соответствующих полиномиальным уравнениям, вытекающим из уравнений (11)–(14) с учетом равенств (21)–(23) [12].

В работе [15] было показано, что условия  $i)$  –  $iv)$  могут быть выполнены, если полиномы желаемой передаточной функции  $W_{yg}^*(p) = H_0^*(p)/D^*(p)$  (15) удовлетворяют условиям:

$$\mu_{yg}^* = \deg D^*(p) - \deg H_0^*(p) \geq \mu_{об}^* + \mu_{yy}^*, \quad H_0^*(p) = B_{\bar{\Omega}}(p)\bar{H}_0^*(p), \quad (24)$$

$$n_{сис} = \deg D^*(p) \geq 2n + \mu_{yy}^* - 1, \quad (25)$$

а степень полинома  $M_{\Omega}(p)$  в равенствах (22), (23) определяется выражением

$$\deg M_{\Omega}(p) = \max\{0; 2n - 1 + \mu_{yy}^* - \deg[A_{\Omega}(p)B_{\Omega}(p)D^*(p)]\}. \quad (26)$$

С целью обеспечения астатизма некоторого порядка или селективной инвариантности по отношению к задающему воздействию и внешним возмущениям полином  $\tilde{R}(p)$  в выражениях (21) можно взять в виде  $\tilde{R}(p) = \Phi(p)\tilde{R}(p)$ , а полиномы  $\tilde{L}(p)$  и  $\tilde{Q}(p)$  – так, чтобы  $\tilde{L}(p) - \tilde{Q}_0(p) = G(p)\tilde{L}(p)$ , где  $\tilde{R}(p)$  и  $\tilde{L}(p)$  – некоторые полиномы и  $Q_1(p) = F_1(p)\tilde{Q}_1(p)$ . При этом  $\Phi(p) = \text{НОК}\{G(p), F_1(p), F_2(p)\}$ , а полиномы  $G(p)$  и  $F_1(p)$ ,  $F_2(p)$  – суть  $K(p)$ -изображения воздействия  $g(t)$  и возмущений  $f_1(t)$ ,  $f_2(t)$ . При таком выборе полинома  $\tilde{R}(p)$ , условие (25) заменяется неравенством  $\deg D(p) \geq 2n + \deg \Phi(p) + \mu_{yy}^* - 1$  [11]. Однако, если  $f_1(t) \equiv 0$  и (или)  $f_2(t) \equiv 0$ , то  $\Phi_0(p) = G^{-1}(p)\Phi(p)$  и (или)  $\Phi_1(p) = F_1^{-1}(p)\Phi(p)$ .

При этих условиях из выражений (12), (13), (15) и (20)–(23) следует, что передаточная функция по ошибке от задающего воздействия, реализуемая системой (8), (9), имеет вид:

$$W_{eg}(p) = \frac{\tilde{H}_0(p)G(p)}{D^*(p)}, \quad (27)$$

где полином  $\tilde{H}_0(p) = A_{\Omega}(p)\Phi_0(p)\tilde{R}(p) + \beta_{m_0}B_{\Omega}(p)\tilde{L}(p)$  – полином, часть коэффициентов которого может быть назначена с целью придания желаемых свойств замкнутой системе по каналу  $g \rightarrow y$ ; полином  $\Phi_0(p) = G^{-1}(p)\Phi(p)$ .

Передаточные функции  $W_{yf_j}^*(p)$ ,  $j = 1, 2$  по измеряемому и неизмеряемому возмущениям, реализуемые системой (8), (9), имеют вид:

$$W_{yf_1}^*(p) = \frac{\tilde{H}_1^*(p)F_1(p)}{A(p)D^*(p)M_{\Omega}(p)}, \quad W_{yf_2}^*(p) = \frac{\tilde{R}_2(p)B_2(p)F_2(p)}{A(p)D^*(p)M_{\Omega}(p)}. \quad (28)$$

Здесь  $\tilde{H}_1(p) = \beta_{m_0}B_{\Omega}(p)\tilde{Q}_1(p) + B_1(p)\Phi_1(p)\tilde{R}(p)$  – полином; часть его коэффициентов также может быть назначена с целью придания желаемых свойств замкнутой системе по каналу  $f_1 \rightarrow y$ ;  $\Phi_1(p) = F_1^{-1}(p)\Phi(p)$ , а  $\tilde{R}_2(p) = F_2^{-1}(p)\tilde{R}(p)$ .

По каналу  $f_2 \rightarrow y$ , т.е. по неизмеряемому возмущению, выбором полинома  $F_2(p)$  можно обеспечить либо астатизм некоторого порядка, либо селективную инвариантность [11]. Отметим, что известные сложности обеспечения устойчивости систем при высоком порядке астатизма здесь не возникают, вследствие применения принципа управления по выходу и воздействиям.

Выражения (24) и (25), (26) представляют собой условия реализуемости передаточной функции  $W_{yg}^*(p)$  системой с частично заданной структурой. Отметим, что условия (24) хорошо известны и приводятся в работах Я.З. Цыпкина, С.Т. Чен и других авторов [16–20]. Условия (25), (26) получены в работе [12] и в более ранних работах не встречались.

Дополнительные условия (25), (26), фактически, обеспечивают, во-первых, разрешимость полиномиального уравнения (11) относительно полиномов  $\tilde{R}(p)$ ,  $L(p)$  при условии (17), а во-вторых, возможность придавать всем коэффициентам полинома  $D^*(p)$  произвольные значения, исходя из желаемых показателей каче-

ства процесса управления. Полином  $M_{\Omega}(p)$  вводится в равенства (21)–(23) для увеличения до необходимой величины порядка системы, реализующей заданную передаточную функцию  $W_{yg}^*(p)$ , удовлетворяющую условиям (24), в тех случаях, когда степень её знаменателя удовлетворяет условиям

$$n - \deg B_{\Omega}(p) + \mu_{yy}^* \leq \deg D^*(p) < \mu_{o6} + \mu_{yy}^* + \deg[B_{\Omega}(p)A_{\Omega}(p)] - 1.$$

Можно показать, что если условия (24) выполнены и  $\deg D^*(p) > \mu_{o6} + \mu_{yy}^* + \deg[B_{\Omega}(p)A_{\Omega}(p)] - 1$ , то согласно (26)  $\deg M_{\Omega}(p) = 0$ , т.е. в этих случаях можно полагать  $M_{\Omega}(p) = 1$

Соотношения (11)–(28) составляют алгоритмическую базу метода аналитического синтеза робастных систем автоматического управления [21–25]. В совокупности с методом динамической декомпозиции метод АССУВВ может применяться и для синтеза многомерных систем автоматического управления.

**3. Примеры синтеза систем управления.** Для иллюстрации возможностей представленного метода синтеза систем автоматического управления рассмотрим два примера.

**Пример 1.** Для объекта, описываемого уравнением

$$(p^3 + 0,8p^2 - p)y = 75u + (0,1p - 2,5)f_2$$

синтезировать систему управления с астатизмом 5-го порядка к задающему воздействию и 4-го порядка к неизмеряемому возмущению  $f_2$ . Время регулирования  $t_p \leq t_p^* = 5$  с и перерегулирование  $\sigma \leq \sigma^* = 25\%$ . Измерению доступны задающее воздействие  $g$  и отклонение  $\varepsilon = g - y$ . Относительный порядок МУУ  $\mu_{yy}^* = 0$ .

**Решение.** В данном случае по соотношениям (24)–(27) находим, что  $\deg M_{\Omega}(p) = 0$  полином  $\Phi(p) = p^4$ ,  $r = 6$ ,  $n_{\text{сис}} = 9$ . Передаточная функция системы с астатизмом 5-го порядка в литературе отсутствует. Поэтому желаемая ПФ была сформирована из стандартной ПФ системы шестого порядка с астатизмом третьего порядка. Соответствующая переходная функция приведена на рис. 2. Как видно система имеет требуемые  $t_p = 5$  секунд и  $\sigma = 25\%$ .

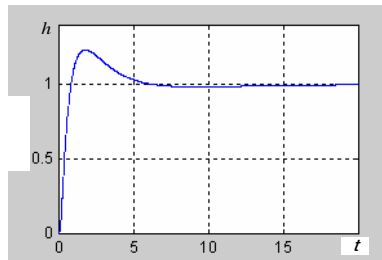


Рис. 2. Переходная функция астатической системы,  $t$  в секундах

В результате выполнения соответствующих расчетов по формулам (11), (12), (14), (16) и (27), (28) получается следующее уравнение «вход выход» контроллера:

$$(p^6 + 91,2p^5 + 3431p^4)u = (4 + 68,45p + 1072p^2 + 5813p^3 + 10478p^4)\varepsilon - (5646p^5 + 725,4p^6)g. \quad (29)$$

Схема, соответствующая уравнению (29), приведена на рис. 3.



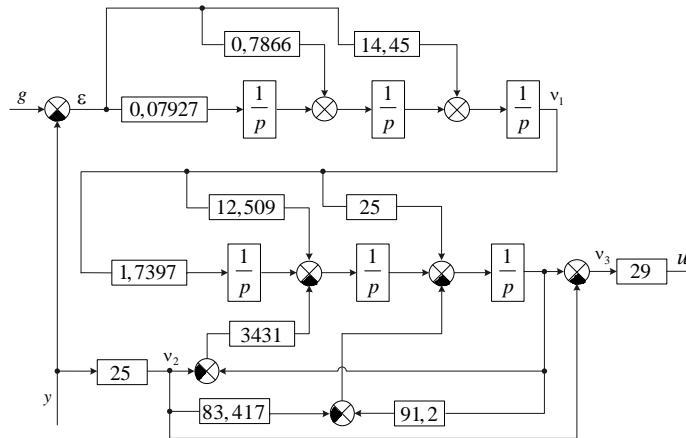


Рис. 3. Схема контроллера системы с астатизмом 5-го порядка

Схема на рис. 3 получена путем перехода к уравнениям МУУ (29) в переменных состояниях с применением соотношений канонической наблюдаемой формы. Для оценки реального порядка астатизма системы проведено её моделирование. Полученные графики отклонений приведены на рис. 4.

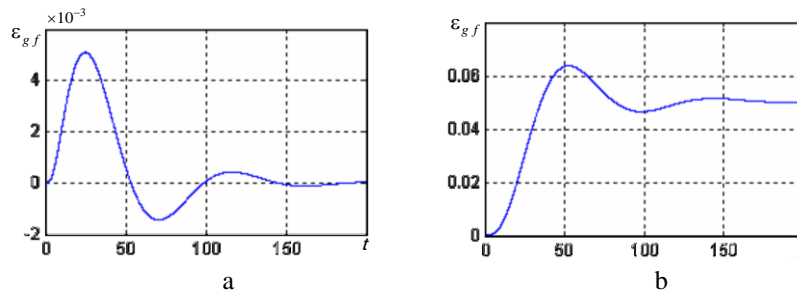


Рис. 4. Отклонения САУ при степенных воздействиях: а – при  $g(t) = 2,5 \cdot 10^{-6} t^4$ ,  $f(t) = 2 \cdot 10^{-4} t^3$ ; б – при  $g(t) = 10^{-5} t^3 + 3 \cdot 10^{-7} t^5$  и  $f(t) = 2 \cdot 10^{-4} t^3$ ,  $t$  в секундах

Результаты моделирования свидетельствуют, что синтезированная система, действительно, имеет требуемые порядки астатизма.

Покажем, что предложенный метод АССУВВ может применяться и для синтеза многомерных систем управления.

**Пример 2.** Синтезировать абсолютно инвариантную систему управления многомерной силовой установкой летательного аппарата (ЛА), которая в режиме полета на малой высоте описывается [20] следующими уравнениями в изображениях по Лапласу:

$$A(p)y_1(p) = (0,62p + 1,34)u_1(p) - (0,31p + 0,48)u_2(p);$$

$$A(p)y_2(p) = (0,14p^2 + 0,41p + 0,29)u_1(p) - B_{22}(0,18p^2 + 0,51p + 0,32)u_2(p), \quad (30)$$

где  $A(p) = 0,6074p^2 + 1,6671p + 1$ ;  $y_1$  и  $y_2$  – управляемые переменные;  $u_1$  и  $u_2$  – управления силовой установкой ЛА; задающие воздействия  $g_i$  и отклонения  $\epsilon_i = g_i - y_i$ ,  $i = 1, 2$  измеряются. Величина  $\mu_{yy}^* \geq 0$ .

**Решение.** В данном случае по отношению к переменной  $y_2$  выполняются условия достижимости абсолютной устойчивости по критерию Г.В. Щипанова, а по отношению к переменной  $y_1$  – по критерию двухканальности Б.Н. Петрова [3, 18, 23]. В результате применения рассматриваемого метода аналитического синтеза в соответствии с выражениями (11)–(28) получены следующие уравнения искомого МУУ:

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}}_1 &= 17,2223\varepsilon_1; & \dot{\tilde{x}}_2 &= \tilde{x}_1 - 2,1613\tilde{x}_2 - 7,5508y_1 - 0,30646u_2; \\ u_1 &= \tilde{x}_2 - 4,9525y_1 + 0,5u_2; & u_2 &= 5\varepsilon_2 + 0,25w; & w &= 4u_2. \end{aligned} \quad (31)$$

Структурная схема, соответствующая уравнениям (31), приведена на рис. 5.

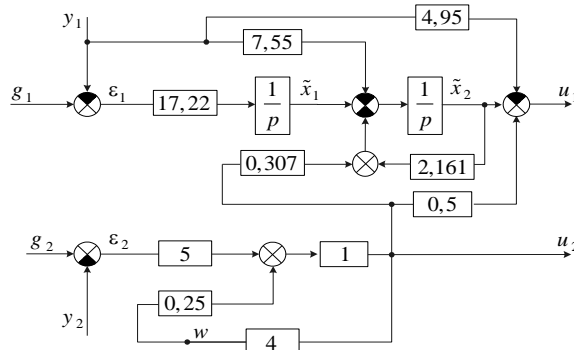


Рис. 5. Схема контроллера инвариантной системы

Моделирование системы (30), (31) проводилось в MATLAB; на рис. 6–8 приведены процессы, полученные при нулевых начальных условиях и задающих воздействиях  $g_1 = 1 + 0,2t$  и  $g_2 = 2 \sin t$ .

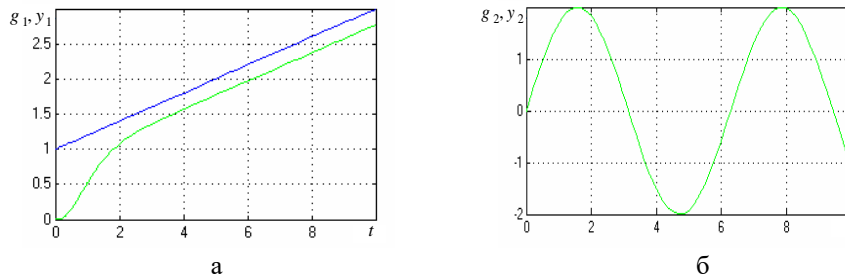


Рис. 6. Задающие воздействия и управляемые переменные,  $t$  в секундах

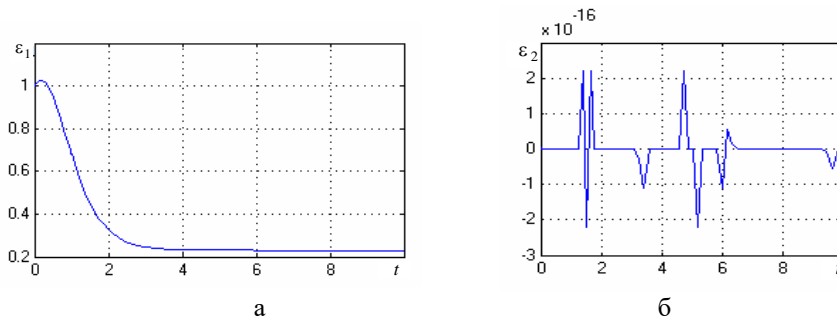


Рис. 7. Отклонения первого и второго каналов,  $t$  в секундах

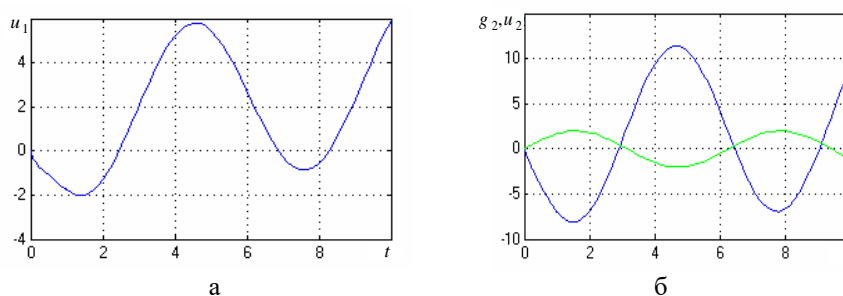


Рис. 8. Управления  $u_1$ ,  $u_2$  и задающее воздействие  $g_2$ ,  $t$  в секундах

Как видно из графиков, управляемая переменная  $y_2$  полностью совпадает с задающим воздействием  $g_2$ , т.е. канал  $g_2 \rightarrow y_2$ , действительно, является абсолютно инвариантным к неизмеряемому возмущению. Отклонение  $\varepsilon_2$ , действующее на входе МУУ (см. рис. 5), практически равно нулю при всех  $t$  (см. рис. 7,б). Несмотря на это ограниченное колебательное управление  $u_2$ , противоположное по знаку задающему воздействию  $g_2$  наблюдается на выходе этого МУУ (см. рис. 8,б). Из графиков, приведенных на рис. 7,а и рис. 8,а, следует, что канал  $g_1 \rightarrow y_1$  имеет первый порядок астатизма к задающему воздействию, а его отклонение  $\varepsilon_1$  является абсолютно инвариантным к управлению  $u_2$ , которое вводится в регулятор этого канала (см. рис. 5).

Полученные результаты свидетельствуют, что рассматриваемый метод аналитического синтеза позволяет создавать системы управления с заданными показателями качества в переходном и в установившемся режиме.

**Заключение.** Метод аналитического синтеза систем с управлением по выходу и воздействиям (АССУВВ) может использоваться для создания робастных систем автоматического управления с желаемыми показателями качества в переходном и в установившемся режиме. Системы с согласованными полюсами являются менее сложными и более робастными. Предложенный метод синтеза может применяться для создания систем управления техническими объектами химической, текстильной, пищевой и других сфер промышленного производства, в том числе, и для создания систем специального назначения, например, систем управления подвижными объектами. В совокупности с методом динамической декомпозиции предложенный метод АССУВВ может применяться и в случае многомерных объектов управления. Эффективность метода аналитического синтеза систем управления иллюстрирована численными примерами.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Mochida T., Nonaka N., Tanaka Y.A. A computer-aided system for designing a pump-impeller // Proceedings of ICAIS'2002 Congress on Autonomous Intelligent systems. – 2002. – P. 128-134.
2. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu., Gaiduk A.R. Control method for vehicles on base of natural energy recovery // Applied Mechanics and Materials. – 2013. – Vol. 670-671. – P. 1330-1336. doi:10.4028/www.scientific.
3. Гайдук А.Р. Абсолютно инвариантное управление энергетической установкой летательного аппарата // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2010. – № 11. – С. 65-68.
4. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu. Dynamic control of micro robots with state and parameters estimation // Proc. of the Second International Workshop on Microfactories (IMWF-2000). Fribourg, Switzerland, 2000. – P. 145-149.
5. Gaiduk A.R., Vershinin Yu.A. Computer aided optimal system design // Proc. of IEEE Conference CACSD-2002, Glasgow, UK, 2002. – P. 471-477.

6. *Preitl S., Precup R.E.* An extension of tuning relations after symmetrical optimum method for PI and PID controllers // *Avtomatica*. – 1999. – Vol. 35. – P. 1731-1736.
7. *Ali M.Y., Mohamed Z., Ghareeb M.* Improved power system stabilizer by applying LQG controller // *WSEAS Trans. on systems and control*. – 2014. – Vol. 9, art. No. 41. – P. 398-404. – ISSN/E-ISSN: 1991-8763/2224-2856.
8. *Филимонов Н.Б.* Проблема качества процессов управления: смена оптимизационной парадигмы // *Мехатроника, автоматизация, управление*. – 2010. – № 12. – С. 2-10.
9. *Тютюков В.В., Тарарыкин С.В.* Робастное модальное управление технологическими объектами. – Иваново, 2006. – ISBN 5-89482-390-0.
10. *Филимонов А.В., Филимонов Н.Б.* Концепция проблемы неробастности спектра в задаче модального управления // *Мехатроника, автоматизация, управление*. – 2011. – № 10. – С. 8-13.
11. *Гайдук А.Р.* Теория и методы аналитического синтеза систем автоматического управления. – М.: Физматлит, 2012. – 360 с.
12. *Гайдук А.Р.* Синтез систем автоматического управления по передаточным функциям // *Автоматика и телемеханика*. – 1980. – Т. 41, № 1. – С. 8-13.
13. *Нейдорф Р.А., Сащенко Д.С.* Параметрический синтез законов управления на основе обобщенных корневых ограничений // *Труды Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях ММТТ-16»*. – СПб., 2003. – Т. 2. – С. 67-69.
14. *Плаксиенко Е.А., Гайдук А.Р.* Синтез динамических систем по требуемым показателям качества // *Мехатроника, автоматизация, управление*. – 2008. – № 4. – С. 7-12.
15. *Gaiduk A.R., Stojković N.M.* Formation of Transfer Function for Control Systems under Implementation Conditions // *FACTA UNIVERSITATIS, Series: Automatic Control and Robotics*. – 2014. – Vol. 13, No. 1. – P. 15-25.
16. *Цыпкин Я.З.* Теоретические основы автоматических систем. – М.: Наука, 1977. – 560 с.
17. *Chen C.T.* Linear system theory and design. – Oxford university press, 1999.
18. *Бесекерский В.А., Попов В.А.* Теория систем автоматического управления. – СПб.: Профессия, 2004.
19. *Kwakernaak H., Sivan R.* Linear optimal control systems. – New York, Wiley Interscience, 1972.
20. *Бабак С.Ф., Васильев В.И., Ильясов Б.Г.* Основы теории многомерных систем управления летательных аппаратов: учеб. пособие. – М.: Изд-во МАИ, 1995.
21. *Тарарыкин С.В., Аполонский В.В.* Методы синтеза редуцированных динамических систем управления // *Мехатроника, автоматизация, управление*. – 2015. – № 16. – С. 75-80.
22. *Поляк Б.Т., Щербаков П.С.* Робастная устойчивость и управление. – М.: Наука, 2002. – 303 с.
23. *Glover K.* All optimal Hankel norm approximation of linear multivariable systems and their  $L_\infty$ -error bounds // *International Journal Control*. – 1984. – Vol. 39, No. 6. – P. 1145-1193.
24. *Safonov M.G., Chiang R.Y., Limebeer D.J.N.* Optimal Hankel Model Reduction for Nonminimal Systems // *IEEE Transaction on Automation Control*. – 1990. – Vol. 35, No. 4. – P. 496-502.
25. *Гайдук А.Р., Плаксиенко Е.А.* Робастность редуцированных динамических систем автоматизации // *Мехатроника, автоматизация, управление*. – 2016. – Т. 17, № 5. – С. 308-315. DOI: 10.17587/mau/16.308-315.

#### REFERENCES

1. *Mochida T., Nonaka N., Tanaka Y.A.* A computer-aided system for designing a pump-impeller, *Proceedings of ICAIS'2002 Congress on Autonomous Intelligent systems*, 2002, pp. 128-134.
2. *Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu., Gaiduk A.R.* Control method for vehicles on base of natural energy recovery, *Applied Mechanics and Materials*, 2013, Vol. 670-671, pp. 1330-1336. doi:10.4028/www.scientific.
3. *Gaiduk A.R.* Absolyutno invariantnoe upravlenie energeticheskoy ustanovkoy letatel'nogo apparata [Absolutely invariant control power plant of the aircraft], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, Automation, Control], 2010, No. 11, pp. 65-68.
4. *Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu.* Dynamic control of micro robots with state and parameters estimation, *Proc. of the Second International Workshop on Microfactories (IMWF-2000)*, Fribourg, Switzerland, 2000, pp. 145-149.
5. *Gaiduk A.R., Vershinin Yu.A.* Computer aided optimal system design, *Proc. of IEEE Conference CACSD-2002, Glasgow, UK, 2002*, pp. 471-477.

6. Preitl S., Precup R.E. An extension of tuning relations after symmetrical optimum method for PI and PID controllers, *Avtomatica*, 1999, Vol. 35, pp. 1731-1736.
7. Ali M.Y., Mohamed Z., Ghareeb M. Improved power system stabilizer by applying LQG controller, *WSEAS Trans. on systems and control*, 2014, Vol. 9, art. No. 41, pp. 398-404. ISSN/E-ISSN: 1991-8763/2224-2856.
8. Filimonov N.B. Problema kachestva protsessov upravleniya: smena optimizatsionnoy paradigmy [The quality problem of control processes: the change of optimization paradigm], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, Automation, Control], 2010, No. 12, pp. 2-10.
9. Tyutikov V.V., Tararykin S.V. Robustnoe modal'noe upravlenie tekhnologicheskimi ob'ektami [Robust modal control of technological objects]. Ivanovo, 2006. ISBN 5-89482-390-0.
10. Filimonov A.V., Filimonov N.B. Kontsepsiya problemy nerobastnosti spektra v zadache modal'nogo upravleniya [The concept of the problem of probastat spectrum in the problem of modal control], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, Automation, Control], 2011, No. 10, pp. 8-13.
11. Gayduk A.R. Teoriya i metody analiticheskogo sinteza sistem avtomaticheskogo upravleniya [Theory and methods of analytical synthesis of automatic control systems]. Moscow: Fizmatlit, 2012, 360 p.
12. Gayduk A.R. Sintez sistem avtomaticheskogo upravleniya po peredatochnym funktsiyam [Synthesis of automatic control systems by transfer functions], *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and remote control], 1980, Vol. 41, No. 1, pp. 8-13.
13. Neydorf R.A., Sashenko D.S. Parametricheskii sintez zakonov upravleniya na osnove obobshchennykh kornevykh ogranicheniy [Parametric synthesis of control laws on the basis of the generalized root restriction], *Trudy Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyakh MMTT-16»* [Proceedings of International scientific conference "Mathematical methods in technics and technologies mmtt-16"]. Saint-Petersburg, 2003, Vol. 2, pp. 67-69.
14. Plaksienko E.A., Gayduk A.R. Sintez dinamicheskikh sistem po trebuemym pokazatelyam kachestva [Synthesis of dynamical systems on required quality indicators], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, Automation, Control], 2008, No. 4, pp. 7-12.
15. Gaiduk A.R. Stojković N.M. Formation of Transfer Function for Control Systems under Implementation Conditions, *FACTA UNIVERSITATIS, Series: Automatic Control and Robotics*, 2014, Vol. 13, No. 1, pp. 15-25.
16. Tsyplin Ya.Z. Teoreticheskie osnovy avtomaticheskikh sistem [Theoretical bases of automatic systems]. Moscow: Nauka, 1977, 560 p.
17. Chen C.T. Linear system theory and design. Oxford university press, 1999.
18. Besezerskiy V.A., Popov V.A. Teoriya sistem avtomaticheskogo upravleniya [The theory of automatic control systems.]. Saint Petersburg: Professiya, 2004.
19. Kwakernaak H., Sivan R. Linear optimal control systems. New York, Wiley Interscience, 1972.
20. Babak S.F., Vasil'ev V.I., Il'yasov B.G. Osnovy teorii mnogomernykh sistem upravleniya letatel'nykh apparatov: ucheb. posobie [Fundamentals of the theory of multidimensional control systems of flying machines: textbook]. Moscow: Izd-vo MAI, 1995.
21. Tararykin S.V., Apolonskiy V.V. Metody sinteza redutsirovannykh dinamicheskikh sistem upravleniya [Methods of synthesis of reduced dynamical control systems], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, Automation, Control], 2015, No. 16, pp. 75-80.
22. Polyak B.T., Shcherbakov P.S. Robastnaya ustoychivost' i upravlenie [Robust stability and control]. Moscow: Nauka, 2002, 303 p.
26. Glover K. All optimal Hankel norm approximation of linear multivariable systems and their  $L_\infty$ -error bounds, *International Journal Control*, 1984, Vol. 39, No. 6, pp. 1145-1193.
27. Safonov M.G., Chiang R.Y., Limebeer D.J.N. Optimal Hankel Model Reduction for Nonminimal Systems, *IEEE Transaction on Automation Control*, 1990, Vol. 35, No. 4, pp. 496-502.
23. Gayduk A.R., Plaksienko E.A. Robastnost' redutsirovannykh dinamicheskikh sistem avtomatizatsii [The robustness of the reduced dynamic automation systems], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, Automation, Control], 2016, Vol. 17, No. 5, pp. 308-315. DOI: 10.17587/mau/16.308-315.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Р.А. Нейдорф.

**Гайдук Анатолий Романович** – Южный федеральный университет; e-mail: gaiduk\_2003@mail.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371689; кафедра САУ; профессор.

**Медведев Михаил Юрьевич** – e-mail: medvmihal@sfnedu.ru; 347928, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2; тел.: 88634371694; кафедра робототехники и мехатроники; зав. кафедрой; профессор.

**Плаксенко Елена Анатольевна** – Таганрогский институт управления и экономики; e-mail: pumkad@mail.ru; 347900, г. Таганрог, ул. Петровская, 45; тел.: 88634362583; кафедра математики и информатики; доцент.

**Gaiduk Anatoly Romanovich** – Southern Federal University; e-mail: gaiduk\_2003@mail.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371689; the department of automatic control systems; professor.

**Medvedev Mikhail Yurevich** – e-mail: medvmihal@sfnedu.ru; 2, Shevchenko street, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371694; the department of robototekhnik and mekhatronik; head of department; professor.

**Plaksienko Elena Anatolievna** – Taganrog Institute of Management and Economy; e-mail: pumkad@mail.ru; 45, Petrovskaya street, Taganrog, 347900, Russia; phone: +78634 362583; the department of mathematic and informatics; associate professor.

УДК 535.1:535.2:623.6

DOI 10.23683/2311-3103-2017-6-279-291

**Е.Н. Семашкин**

### **МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВСЕПОГОДНОСТИ ОПТИЧЕСКИХ КАНАЛОВ УПРАВЛЕНИЯ**

*Рассматривается методология определения показателей всепогодности оптических каналов управления и передачи информации в совокупности условий, определяющих прозрачность атмосферы. Рассматривается приземный слой атмосферы до нижней границы облачности. Алгоритм построен на базе экспериментального распределения дальности метеовидимости в функции дефицита влажности атмосферы, полученного Лабораторией атмосферной оптики Главной геофизической обсерватории (г. Ленинград) в 1967 году для четырёх метеопунктов Советского Союза: Воейково (г. Ленинград), Меганом (Крым), Чакви (Батуми, Грузия) и Пицунда (Абхазия). Дефицит влажности определяется температурой и относительной влажностью воздуха, что допускает при его определении использования эмпирических законов распределения «температура – относительная влажность воздуха» для ряда метеопунктов холодного, умеренного и жаркого климатов. Добавление к нему блоков осадков и тумана позволяет получать полный показатель ослабления оптических сигналов атмосферой, вычислять дальность действия канала и частоту работы канала на фиксированной дальности в совокупности условий окружающей среды. Технология определения дальности обнаружения площадных объектов осуществляется на базе теории линейной фильтрации, при которой контрасты от объекта наблюдения, прошедшие через рассеивающую и неоднородную атмосферу, сравниваются с контрастами, разрешаемыми прибором. Ослабление сигналов в атмосфере определялось на основе соотношений Рэлея и теории Ми. Для иллюстрации возможностей методики определены показатели всепогодности трёх наблюдательных приборов с узкими (около 1°) полями зрения: телекамеры (диапазон длин волн  $\Delta\lambda=0,5\div 0,7$  мкм), тепловизор средневолнового диапазона ( $\Delta\lambda=3,7\div 4,8$  мкм) и тепловизор длинноволнового диапазона ( $\Delta\lambda=7,7\div 10$  мкм). Зрительная задача предполагает обнаружение объекта размером  $3\times 3$  м, имеющего визуальный контраст 0,2 и температурный контраст  $\Delta T=2^\circ$ . Наблюдение осуществляется в двух метеопунктах с сильно отличающимися климатическими характеристиками: влажном и холодном Диксоне и жарком и сухом Аиххабаде. В результате моделирования установлено, что в холодном влажном климате телекамера на всех дальностях действия сильно проигрывает тепловизору. Показатели всепогодности тепловизоров в жарком сухом климате на 10÷15 % выше, чем во влажном холодном.*

*Оптические каналы.*