УДК 681.513

Л. Н. БЛОХИН, С. И. ОСАДЧИЙ

Национальный авиационный университет, Кировоградский национальный технический университет, Украина

СИНТЕЗ ОПТИМИЗИРОВАННЫХ СТРУКТУР РЕГУЛЯТОРОВ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ПОДВИЖНЫМ ОБЪЕКТОМ

В статье представлен новый метод структурного преобразования незамкнутой системы управления, который позволяет находить оптимальный по квадратичному критерию регулятор. Незамкнутые системы находят все большее распространение при проектировании бортовых систем управления движением подвижных объектов с использованием SCADA технологий. Синтез регулятора предлагается проводить в частотной области как при случайных, так и при регулярных воздействиях. Предложенные алгоритмы синтеза могут быть применены в случае, если объект управления является линейным, а динамика воздействий описывается дробно-рациональными функциями комплексного аргумента.

Ключевые слова: *подвижный объект, стохастический, разомкнутая система, регулятор, синтез, факторизация, сепарация, матрица, оптимальная структура.*

Введение

Повышение точности следования по заданной траектории беспилотных летательных аппаратов является актуальной научно-технической задачей. Как правило, системы дистанционного управления такими подвижными объектами [1] включают ряд унифицированных модулей. К их числу относят модуль управления – регулятор, модуль регулирующего органа – систему отработки команд регулятора. Современный модуль управления, как правило, является микропроцессорным устройством с изменяемым законом управления. В тоже время модуль отработки работает по жесткой программе.

Достаточно часто такие модули образуют разомкнутую систему автоматического управления (рис. 1). Повышение точности систем управления объектами указанного класса требует разработки новых методов синтеза оптимальных законов управления.

Как развитие идей, изложенных в монографии [2], в данной работе ставится и решается задача синтеза оптимизированных структур частей регулятора в разомкнутой системе управления линейным многомерным подвижным объектом при стохастических воздействиях.

1. Постановка задачи

Структурная схема исследуемой системы представлена на рис. 1 и включает объект управления, помеченный пунктиром, и регулятор W.

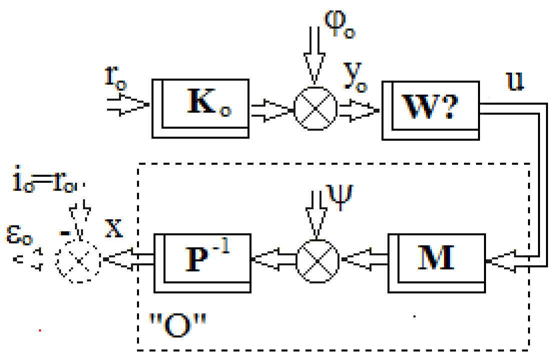

Рис. 1. Структурная схема исследуемой системы управления подвижным объектом

Полагается, что исследуемое движение объекта можно описать системой обыкновенных дифференциальных уравнений, преобразованных по Лапласу, вида

$$Px = Mu + \psi , \tag{1}$$

где P – полиномиальная матрица аргумента $s=j\omega$ размерности $n\times n$;

x – n-мерный вектор частотных характеристик выходных координат объекта;

M – полиномиальная матрица размерности $m\times n$;

u – m-мерный вектор частотных характеристик управляющих воздействий;

ψ – n-мерный вектор частотных характеристик возмущений, действующих на объект.

На схеме также представлены матрица K_o частотных характеристик задатчика программы движения размерности $n\times n$, искомая матрица W передаточных функций регулятора размерности n×m, а также изображение n-мерного вектора программных сигналов r_o, равного вектору желаемых сигналов i_o, изображение вектора помех задания программы φ_o и m-мерного вектора сигналов управления u.

Схему (рис. 1) исследуемой системы управления для намеченного решения поставленной задачи целесообразно преобразовать к виду (рис. 2).

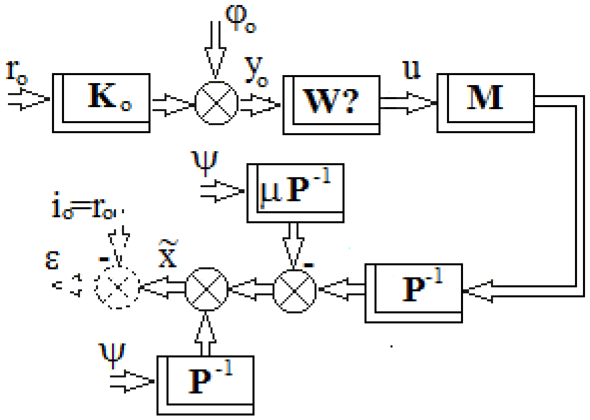

Рис. 2. Структурная схема преобразованной системы

Структурная схема системы (рис. 2) отличается от структуры системы (рис.1) вводом дополнительного вектора сигналов, ориентировочно компенсирующих внешнее воздействие на объект управления с помощью сформированной матрицы μP^{-1}, где μ – коэффициент, учитывающий возможную неточность задания компенсирующего воздействия. Вектор выходных координат объекта управления после указанной компенсации обозначен как $\tilde{x}$.

Согласно схеме (рис. 2) частотные характеристики вектора $\tilde{x}$ определяются уравнением

$$\tilde{x} = x - \mu P^{-1}\psi = P^{-1}MWy_0 + (1-\mu)P^{-1}\psi\,. \qquad (2)$$

Предположим, что вектор возмущений можно описать формулой

$$\psi = \Psi_0 g\,,$$

где Ψ_0 – вектор частотных характеристик возмущения ψ, если такое возмущение носит детерминированный характер, или матрица передаточных функций формирующего фильтра, если возмущение является стационарным случайным процессом;

g – коэффициент равный единице при детерминированном возмущении и равный Δ (белый шум единичной интенсивности) при случайном возмущении.

В таком случае, введя обозначения $\Phi_1 = P^{-1}M$ и $\Phi_2 = P^{-1}\Psi_0$, уравнение (2) следует записать так

$$\tilde{x} = \Phi_1 W y_0 + (1-\mu)\Phi_2 g\,, \qquad (3)$$

а изображения вектора сигналов ошибок выходов преобразованной системы представить в виде

$$\varepsilon = \tilde{x} - r_0 = \Phi_1 W(K_0 r_0 + \varphi_0) + [(1-\mu)\Phi_2 g - r_0]\,. \qquad (4)$$

Изображение вектора сигналов ошибок слежения при детерминированных воздействиях на объект, учитывая выражение (4) и рис. 2, должно быть записано так

$$\bar{\varepsilon} = \Phi_1 \overline{W}(K_0 \bar{r}_0 + \bar{\varphi}_0) + [(1-\mu)\overline{\Phi}_2 - \bar{r}_0], \qquad (5)$$

а изображение вектора сигналов ошибок слежения при случайных воздействиях будет таким

$$\tilde{\varepsilon} = \Phi_1 \widetilde{W}(K_0 \tilde{r}_0 + \tilde{\varphi}_0) + [(1-\mu)\widetilde{\Phi}_2 - \tilde{r}_0]\,. \qquad (6)$$

Предположим, что случайные воздействия, действующие в трактах управления, представляют некоррелированные стационарные случайные процессы с нулевыми математическими ожиданиями. В таком случае, транспонированная матрица спектральных плотностей вектора (6) на основе теоремы Винера-Хинчина [1] , будет иметь вид

$$S'_{\tilde{\varepsilon}\tilde{\varepsilon}} = \lim_{T\to\infty}\langle \tilde{\varepsilon}_T \tilde{\varepsilon}_{T*}\rangle = \Phi_1 \widetilde{W}\left(K_0 S'_{\tilde{r}0\tilde{r}0} K_{0*} + S'_{\tilde{\varphi}\tilde{\varphi}}\right)\times$$
$$\times \widetilde{W}_* \Phi_{1*} - \Phi_1 \widetilde{W} K_0 S'_{\tilde{r}0\tilde{r}0} - S'_{\tilde{r}0\tilde{r}0} K_{0*} \widetilde{W}_* \Phi_{1*} +$$
$$+ (1-\mu)^2 \widetilde{\Phi}_2 \widetilde{\Phi}_{2*} S'_{\tilde{r}0\tilde{r}0}\,, \qquad (7)$$

где T – длина реализации случайного процесса;

$\tilde{\varepsilon}_T$ – вектор реализаций сигналов ошибок слежения длительностью T;

* - знак эрмитового спряжения матриц [3];

< > - символ нахождения математического ожидания;

$S'_{\tilde{r}0\tilde{r}0}$ - транспонированная матрица спектральных плотностей вектора программных сигналов;

$S'_{\tilde{\varphi}\tilde{\varphi}}$ - транспонированная матрица спектральных плотностей помех задания программы.

Функционал качества работы преобразованной системы при детерминированных воздействиях на объект имеет вид

$$I = \frac{1}{2\pi j}\int_{-j\infty}^{j\infty} \mathrm{tr}\left(\bar{\varepsilon}\bar{\varepsilon}_* \overline{R}\right) ds, \qquad (8)$$

где tr – след матрицы [3].

Функционал качества работы преобразованной системы при случайных сигналах в трактах управления представляется как

$$\tilde{e} = \frac{1}{j}\int_{-j\infty}^{j\infty} \mathrm{tr}\left(S'_{\tilde{\varepsilon}\tilde{\varepsilon}} \widetilde{R}\right) ds\,. \qquad (9)$$

В интегралах (8), (9) введены положительно определенные весовые матрицы $\overline{R}$, $\widetilde{R}$., определяющие влияние отдельных компонентов векторов ошибок на качество системы.

Задача синтеза состоит в поиске матрицы передаточных функций регулятора, обеспечивающей минимизацию критерия качества (8), (9).

Поскольку объект управления полагается линейным, то возможно разделенное рассмотрение задач синтеза оптимальных структур частей регулятора для детерминированных и для случайных воздействий с последующим их объединением.

2. Синтез при регулярных воздействиях

Задача синтеза оптимальной структуры регулятора системы управления подвижного объекта при регулярных воздействиях состоит в том, чтобы по заданным полиномиальным матрицам M, P, полиномиальной матрице K_0 и изображениям детерминированных составляющих векторов $\bar r_0, \bar\varphi_0$ и $\bar\psi$ найти физически реализуемую матрицу передаточных функций $\bar W$, которая сохраняет устойчивость системы управления и доставляет минимум функционалу качества (8).

Для решения поставленной задачи использован метод, базирующийся на идеях Винера-Колмогорова, в соответствии с которым в выражение (8) подставлен вектор (5) и найден следующий вид функционала качества I

$$I=\frac{1}{2\pi j}\int\limits_{-j\infty}^{j\infty}\mathrm{tr}\Big\{\Phi_1\bar W\big(K_0\bar r_0\bar r_{0*}K_{0*}+K_0\bar r_0\bar\varphi_{0*}+\bar\varphi_0\bar r_{0*}K_{0*}+\bar\varphi_0\bar\varphi_{0*}\big)\bar W_*\Phi_{1*}+\Phi_1\bar W\big(K_0\bar r_0+\bar\varphi_0\big)\times$$
$$\times\big[\bar\Phi_{2*}(1-\mu)-\bar r_{0*}\big]+\big[(1-\mu)\Phi_2-\bar r_0\big]\big(\bar r_{0*}K_{0*}-\bar\varphi_{0*}\big)\times$$
$$\times\bar W_*\Phi_{1*}+\Big[\big(1-\mu^2\big)\bar\Phi_2\bar\Phi_{2*}-(1-\mu)\bar\Phi_2\bar r_{0*}+\bar r_0\bar r_{0*}-$$
$$-(1-\mu)\bar r_0\bar\Phi_{2*}\Big]\Big\}\bar R\,ds. \qquad (10)$$

Первая вариация полученного функционала (10) на классе устойчивых и физически реализуемых матриц передаточных функций $\bar W$ равна

$$\delta I=\frac{1}{2\pi j}\int\limits_{-j\infty}^{j\infty}\mathrm{tr}\big(\Xi\delta\bar W_*+\delta\bar W\Xi_*\big)ds, \qquad (11)$$

где Ξ – дробно-рациональная матрица, имеющая вид

$$\Xi=\Phi_{1*}\bar R\Phi_1\bar W\big(K_0\bar r_0\bar r_{0*}K_{0*}+K_0\bar r_0\bar\varphi_{0*}+\bar\varphi_0\bar r_{0*}K_{0*}+$$
$$+\bar\varphi_0\bar\varphi_{0*}\big)+\Phi_{1*}\bar R\big[(1-\mu)\bar\Phi_2-\bar r_0\big]\big(\bar r_{0*}K_{0*}+\bar\varphi_{0*}\big).$$

Если в результате винеровской факторизации [3] найти дробно-рациональную матрицу $\bar\Gamma$, устойчивую вместе с обратной и такую, что

$$\bar\Gamma_*\bar\Gamma=\Phi_{1*}\bar R\Phi_1, \qquad (12)$$

в результате j-спектральной факторизации [4] найти дробно-рациональную матрицу $\bar D$ со свойствами аналогичными матрице Г и диагональную числовую вырожденную матрицу J_0

$$J_0=\begin{bmatrix}E & O\\ O & O\end{bmatrix},$$

связанную соотношением

$$\bar D J_0\bar D_*=K_0\bar r_0\bar r_{0*}K_{0*}+K_0\bar r_0\bar\varphi_{0*}+\bar\varphi_0\bar r_{0*}K_{0*}+$$
$$+\bar\varphi_0\bar\varphi_{0*}, \qquad (13)$$

а также выполнить винеровскую сепарацию [1] матрицы T вида

$$T=T_0+T_++T_-=\bar\Gamma_*^{-1}\Phi_{1*}\bar R\big[(1-\mu)\bar\Phi_2-\bar r_0\big]\big(\bar r_{0*}K_{0*}+$$
$$+\bar\varphi_{0*}\big)D_*^{-1}J_0^{\#}, \qquad (14)$$

где # - символ операции псевдообращения матриц, то функционал (11) можно переписать так:

$$\delta I=\frac{1}{2\pi j}\int\limits_{-j\infty}^{j\infty}\mathrm{tr}\Big[\bar\Gamma_*\big(\overline{\Gamma W D}+T\big)\bar D_*J_0\delta\bar W_*+\delta\bar W J_0\bar D\big(T_*+$$
$$+\bar D_*\bar W_*\bar\Gamma_*\big)\bar\Gamma\Big]ds. \qquad (15)$$

В таком случае условие тождественного равенства нулю вариации (15) на классе устойчивых и физически реализуемых матриц передаточных функций представляется следующим образом

$$\overline{\Gamma W D}=-\big(T_0+T_+\big). \qquad (16)$$

Алгоритм синтеза оптимизированной структуры матрицы передаточных функций детерминированного регулятора $\bar W$ с учетом условия (16) должен иметь вид

$$\bar W=-\bar\Gamma^{-1}\big(T_0+T_+\big)D^{-1}, \qquad (17)$$

а оптимизированная оценка вектора изображений выходных сигналов системы будет выглядеть так

$$\bar x=\Phi_1\bar W\big(K_0\bar r_0+\bar\varphi_0\big)+(1-\mu)\bar\Phi_2.$$

Если особенности изображений Лапласа всех компонентов вектора сигналов наблюдения программы движения y_0 лежат только в левой полуплоскости комплексного переменного s=jω, то возможен и другой, частный вариант решения задачи синтеза (по Гантмахеру [2]).

В этом случае, учитывая очевидное (рис. 1) уравнение

$$\bar y_0=K_0\bar r_0+\bar\varphi_0, \qquad (18)$$

дробно-рациональную матрицу Ξ в правой части вариации (11) можно представить как

$$\Xi=\Big\{\Phi_{1*}\bar R\Phi_1\bar W\bar y_0+\Phi_{1*}\bar R\big[(1-\mu)\bar\Phi_2-\bar r_0\big]\Big\}\bar y_{0*} \qquad (19)$$

и ввести новое обозначение для матрицы T

$$T_1=T_{10}+T_{1+}+T_{1-}=\bar\Gamma_*^{-1}\Phi_{1*}\bar R\big[(1-\mu)\bar\Phi_2-\bar r_0\big].$$

С учетом новых обозначений вариацию (15) можно представить как

$$\delta I=\frac{1}{2\pi j}\int\limits_{-j\infty}^{j\infty}\mathrm{tr}\Big[\bar\Gamma_*\big(\overline{\Gamma W}\bar y_0+T_1\big)\bar y_{0*}\delta\bar W_*+\delta\bar W\bar y_0\big(T_{1*}+$$
$$+\bar y_{0*}\bar W_*\bar\Gamma_*\big)\bar\Gamma\Big]ds,$$

а условие ее обнуления на классе устойчивых и физически реализуемых матриц передаточных функций регулятором можно записать в виде

$$\overline{\Gamma W}\bar y_0=-\big(T_{10}+T_{1+}\big).$$

Отсюда, алгоритм синтеза оптимальной структуры исследуемой части регулятора в этом варианте решения задачи будет таким

$$\overline{W} = -\overline{\Gamma}^{-1}\left(T_{10} + T_{1+}\right)\overline{y}_0^{\#}. \qquad (20)$$

Псевдообратный вектор $\overline{y}_0^{\#}$ находится по алгоритму, описанному в книге [2]. В этом случае считается, что вектор $\overline{y}_0^{\#}$ равен

$$\overline{y}_0^{\#} = C^{/}\left(CC^{/}\right)^{-1}\left(B^{/}B\right)^{-1}B^{/}, \qquad (21)$$

где / - знак транспонирования;

$$B = \overline{y}_0;\ C = \begin{pmatrix}1 & 0\end{pmatrix}. \qquad (22)$$

С учетом выражений (21) уравнение (22) преобразуется к виду

$$y_0^{\#} = \begin{bmatrix}1\\0\end{bmatrix}\frac{1}{\sum\limits_{\nu=1}^{n}\overline{y}_{0\nu}^{2}}\overline{y}_0^{/} = \frac{1}{\sum\limits_{\nu=1}^{n}\overline{y}_{0\nu}^{2}}\begin{bmatrix}y_0^{/}\\O_{1\times n}\end{bmatrix}, \qquad (23)$$

где $\overline{y}_{0\upsilon}$ – υ-ый компонент вектора $\overline{y}_0$;

$O_{1\times n}$ – нулевая матрица размерности $1\times n$.

3. Синтез при случайных воздействиях

Задача синтеза оптимальной структуры регулятора системы управления подвижного объекта при случайных воздействиях состоит в том, чтобы по заданным полиномиальным матрицам M, P, K_0, матрице передаточных функций формирующего фильтра $\tilde{\Phi}_2$ и транспонированным дробно-рациональным матрицам спектральных плотностей векторов программных сигналов $S^{/}_{\tilde{r}0\tilde{r}0}$ и помех $S^{/}_{\tilde{\varphi}\tilde{\varphi}}$ найти физически реализуемую матрицу передаточных функций $\tilde{W}$, которая сохраняет устойчивость системы управления и доставляет минимум функционалу качества (9).

Подстановка матрицы (7) в формулу (9) позволяет описать в явном виде связь межу передаточной функцией регулятора и дисперсией ошибки в системе

$$\begin{aligned}\tilde{e} = \frac{1}{j}\int\limits_{-j\infty}^{j\infty} tr\Big[&\Phi_1\tilde{W}\left(K_0 S^{/}_{\tilde{r}0\tilde{r}0}K_{0*} + S^{/}_{\tilde{\varphi}\tilde{\varphi}}\right)\tilde{W}_*\Phi_{1*} - \\ &- \Phi_1\tilde{W}K_0 S^{/}_{\tilde{r}0\tilde{r}0} - S^{/}_{\tilde{r}0\tilde{r}0}K_{0*}\tilde{W}_*\Phi_{1*} + \\ &+ (1-\mu)^2\tilde{\Phi}_2\tilde{\Phi}_{2*}S^{/}_{\tilde{r}0\tilde{r}0}\Big]\tilde{R}ds. \qquad (24)\end{aligned}$$

Поставленная задача синтеза также решается методом Винера-Колмогорова, в соответствии с которым для поиска матрицы передаточных функций оптимального регулятора $\tilde{W}$ необходимо найти первую вариацию функционала (24). Эта вариация равна

$$\delta\tilde{e} = \frac{1}{j}\int\limits_{-j\infty}^{j\infty} tr\left(\Omega\delta\tilde{W}_* + \delta\tilde{W}\Omega_*\right)ds, \qquad (25)$$

где Ω – дробно-рациональная матрица вида

$$\Omega = \Phi_{1*}\tilde{R}\left[\Phi_1\tilde{W}\left(K_0 S^{/}_{\tilde{r}0\tilde{r}0}K_{0*} + S^{/}_{\tilde{\varphi}0\tilde{\varphi}0}\right) - S^{/}_{\tilde{r}0\tilde{r}0}K_{0*}\right].$$

С помощью операций факторизации [3] и сепарации [1] дробно-рациональных матриц в вариацию (26) вводятся следующие обозначения

$$\tilde{\Gamma}_*\tilde{\Gamma} = \Phi_{1*}\tilde{R}\Phi_1;\ \tilde{D}\tilde{D}_* = K_0 S^{/}_{\tilde{r}0\tilde{r}0}K_{0*} + S^{/}_{\tilde{\varphi}0\tilde{\varphi}0};$$

$$\tilde{T} = \tilde{T}_0 + \tilde{T}_+ + \tilde{T}_- = \tilde{\Gamma}_*^{-1}\Phi_{1*}\tilde{R}S^{/}_{\tilde{r}0\tilde{r}0}K_{0*}\tilde{D}_*^{-1}. \qquad (27)$$

Учитывая обозначения (27) дробно-рациональную матрицу Ω следует переписать так

$$\Omega = \tilde{\Gamma}_*\left(\tilde{\Gamma}\tilde{W}\tilde{D} - \tilde{T}\right)\tilde{D}_*,$$

а условие обнуления вариации (25) на классе устойчивых и физически реализуемых матриц $\tilde{W}$ определить уравнением

$$\tilde{\Gamma}\tilde{W}\tilde{D} = \tilde{T}_0 + \tilde{T}_+.$$

Таким образом, алгоритм синтеза оптимизированной структуры части регулятора при случайных воздействиях сводится к вычислению матрицы передаточных функций по формуле

$$\tilde{W} = \tilde{\Gamma}^{-1}\left(\tilde{T}_0 + \tilde{T}_+\right)\tilde{D}^{-1}. \qquad (26)$$

Транспонированная матрица спектральных плотностей случайной составляющей вектора выходных сигналов системы будет иметь вид

$$S^{/}_{xx} = \Phi_1\tilde{W}\tilde{D}\tilde{D}_*\tilde{W}_*\Phi_{1*} + (1-\mu)^2\Phi_2\Phi_{2*}.$$

Объединение регулярного и случайного трактов регулятора с матрицами передаточных функций $\overline{W}$ и $\tilde{W}$ может быть выполнено с использованием идей, представленных в работе [1]. Ключевым вопросом при этом является выделение регулярной и случайной составляющей сигналов, действующих в трактах управления.

4. Пример решения задачи синтеза

Предположим, что на вход инерционной системы первого порядка с одним входом и одним выходом, у которой

$$P = Ts + 1;\ M = m; \qquad (27)$$

подается ступенчатый программный сигнал

$$\overline{r}_0 = \frac{a}{s} \qquad (28)$$

в сопровождении детерминированной помехи

$$\overline{\varphi}_0 = \frac{b}{s} \qquad (29)$$

с помощью задатчика программы с передаточной функцией

$$K_0 = k_0. \qquad (30)$$

Необходимо найти передаточную функцию регулятора $\overline{W}$, обеспечивающего минимум интегральной квадратической ошибке системы (8) в условиях действия возмущения

$$\overline{\psi} = \frac{c}{\tau s + 1}, \qquad (31)$$

если весовой коэффициент $\overline{R}$ равен единице.

Для решения задачи необходимо найти передаточную функцию $\overline{\Psi_0}$ и изображение вектора сигналов наблюдения программы движения $\overline{y}_0$. Учитывая выражение (31) и полагая, что g=1, получено

$$\overline{\Psi}_0 = \frac{c}{\tau s + 1}. \qquad (32)$$

Подстановка соотношений (28)-(30) в уравнение (18) позволяет найти изображение Лапласа вектора $\overline{y}_0$

$$\overline{y}_0 = \frac{a k_0 + b}{s}. \qquad (33)$$

Поскольку все особенности изображения (33) находятся на мнимой оси комплексной плоскости, то для расчета передаточной функции регулятора использован упрощенный алгоритм (20).

Для его использования с учетом обозначений (3) найдена передаточная функция Φ_1

$$\Phi_1 = \frac{m}{Ts + 1} \qquad (34)$$

и эрмитово сопряженная ей функция

$$\Phi_{1*} = \frac{m}{-Ts + 1}. \qquad (35)$$

Подстановка выражений (34), (35) в формулу (12) позволяет определить комплексно сопряженное произведение факторов

$$\overline{\Gamma}_* \Gamma = \frac{m^2}{|Ts + 1|^2},$$

факторизация которого определяет передаточную функцию $\overline{\Gamma}$ как

$$\Gamma = \frac{m}{Ts + 1}. \qquad (36)$$

Для нахождения суммы $T_{10}+T_+$ вместо передаточной функции $\overline{\Phi_2}$ в уравнение для определения T_1 подставлено произведение

$$\overline{\Phi}_2 = P^{-1}\overline{\Psi}_0 = \frac{1}{(Ts+1)(\tau s+1)}$$

и получен следующий результат

$$T_1 = -\frac{a\left\{T\tau s^2 + \left[T + \tau - \frac{(1-\mu)c}{a}\right]s + 1\right\}}{s(Ts+1)(\tau s+1)}. \qquad (37)$$

Поскольку функция (37) не содержит полюсов, расположенных в правой полуплоскости комплексной переменной s=jω, то искомый результат равен

$$T_{10} + T_{1+} = T_1. \qquad (38)$$

Подстановка полученных значений (36), (38) в соотношение (20) с учетом того, что

$$\overline{y}_0^{\#} = \overline{y}_0^{-1} = \frac{s}{a k_0 + b}$$

позволяет определить, что

$$\overline{W} = \frac{a}{(a k_0 + b) m} \frac{T\tau s^2 + \left[T + \tau - (1-\mu)\frac{c}{a}\right]s + 1}{\tau s + 1}. \qquad (39)$$

Подстановка полученного результата (39) в формулу для определения оптимизированной оценки вектора изображений выходных сигналов системы доказывает, что изображение сигнала $\overline{x}$ равно программе $\overline{r}_0$.

Полученный таким образом результат наглядно иллюстрирует эффект от предложенного подхода к синтезу оптимального регулятора, в основе которого лежит введение дополнительного фиктивного сигнала с весом μ в структуру регулятора.

Заключение

Предложенное преобразование исходной структурной схемы позволяет, используя компенсацию регулярной составляющей возмущения, значительно повысить точность воспроизведения регулярной составляющей программы. В рассмотренном примере выходной сигнал системы абсолютно точно повторяет программу, несмотря на инерционность объекта управления и помеху измерений.

Дальнейшие исследования применения преобразования структурной схемы целесообразно выполнить для замкнутой системы управления.

Литература

1. *Современные информационные технологии в задачах навигации и наведения беспилотных маневренных летательных аппаратов [Текст] : монография / Под ред. М. Н. Красильщикова, Г. Г. Серебрякова. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 556 с.*
2. *Азарсков, В. Н. Методология конструирования оптимальных систем стохастической стабилизации [Текст] : монография / В. Н. Азарсков, Л. Н. Блохин, Л. С. Житецкий. – К. : НАУ, 2006. – 437 с.*
3. *Гантмахер, Ф. Р. Теория матриц [Текст] : учебник / Ф. Р. Ганмахер. – М. : Наука, 1988. – 575 с.*
4. *Davis, M. C. Factoring the Spectral Matrix [Text] / M. C. Davis // IEEE Trans. Auto. Cont. – 1963 – AG-8, N.4. – P. 296-305.*
5. *A State Space Approach to Canonical Factorization with Applications [Text] / B. Harm, I. Gohberg, M. A. Kaashoek, A. C. M. Ran. – Birckhauser : Springer Basel AG, 2010. – 419 p.*

Поступила в редакцию 10.07.2015, рассмотрена на редколлегии 14.10.2015

**СИНТЕЗ ОПТИМІЗОВАНИХ СТРУКТУР РЕГУЛЯТОРІВ
У СИСТЕМІ УПРАВЛІННЯ РУХОМИМ ОБ'ЄКТОМ**

Л. М. Блохін, С. І. Осадчий

У статті наведено новий метод структурного перетворення розімкненої системи управління, який дозволяє знаходити оптимальний за квадратичним критерієм регулятор. Розімкнені системи знаходять все більше розповсюдження при проектуванні систем керування рухом рухомих об'єктів з використанням SCADA технологій. Синтез регулятора пропонується проводити у частотній області як при випадкових, так і при регулярних впливах. Запропоновані алгоритми синтезу можуть бути застосовані у випадку, якщо об'єкт управління є лінійним, а динаміка впливів, описується дробово-раціональніми функціями комплексної змінної.

Ключові слова: рухомий об'єкт, стохастичний, розімкнена система, регулятор, синтез, факторизація, сепарація, матриця, оптимальна структура.

**SYNTHESIS OF THE OPTIMIZED STRUCTURES OF REGULATORS
FOR THE CONTROL SYSTEMS OF A MOVING OBJECT**

L. N. Blokhin, S. I. Osadchy

The paper presents a new method for the structural transformation of an open loop control system that allows somebody to find the optimum regulator in accordance with a quadratic criterion of the control quality. Open loop control systems are becoming more common in the design of on-board control systems of the moving objects movement with the help of the SCADA technology. Synthesis of the regulator is proposed to conduct in the frequency domain either at the random or at the regular effects. The proposed synthesis algorithms can be applied if the object of control is linear and the effects dynamic is described with the help of a rational function of the complex argument.

Key words: moving object, stochastic, open-loop system, the regulator, synthesis, factorization, separation, matrix, optimal structure.

Блохин Леонид Николаевич – д-р техн. наук, проф., проф. каф. систем управления летательных аппаратов, Национальный авиационный университет, г. Киев, Украина.

Осадчий Сергей Иванович – д-р техн. наук, проф., зав. каф. автоматизации производственных процессов, Кировоградский национальный технический университет, г. Кировоград, Украина, e-mail: srg2005@ukr.net.