

Пшихопов Вячеслав Хасанович – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: pshichop@rambler.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371694; кафедра электротехники и мехатроники; зав. кафедрой; д.т.н.

Медведев Михаил Юрьевич – e-mail: medvmihal@gmail.com; кафедра электротехники и мехатроники; д.т.н.; профессор.

Беляев Виктор Егорович – e-mail: toe@tsure.ru; кафедра электротехники и мехатроники; к.т.н.; старший научный сотрудник.

Полуянович Николай Константинович – кафедра электротехники и мехатроники; к.т.н., доцент.

Волощенко Юрий Петрович – кафедра электротехники и мехатроники; к.т.н., доцент.

Гайдук Анатолий Романович – e-mail: gaiduk_2003@mail.ru; тел.: 88634371689; кафедра систем автоматического управления; д.т.н.; профессор.

Pshikhov Vyacheslav Khasanjvich – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: pshichop@rambler.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371694; the department of electrical engineering and mechatronics; head the department; dr. of eng. sc.

Medvedev Mikhail Yur'evich – e-mail: medvmihal@gmail.com; the department of electrical engineering and mechatronics; dr. of eng. sc.; professor.

Belyaev Viktor Egorovich – e-mail: toe@tsure.ru; the department of electrical engineering and mechatronics; cand. of eng. sc.; senior scientist.

Poluyanovich Nikolay Kjnstantinovich – the department of electrical engineering and mechatronics; cand. of eng. sc.; associate professor.

Voloshchenko Yuriy Petrovich – the department of electrical engineering and mechatronics; cand. of eng. sc.; associate professor.

Gaiduk Anatoly Romanovich – e-mail: gaiduk_2003@mail.ru; phone: +78634371689; the department of automatic control systems; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 681.513

В.Х. Пшихопов, М.Ю. Медведев

АЛГОРИТМЫ ОЦЕНИВАНИЯ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНОГО РОБОТИЗИРОВАННОГО ДИРИЖАБЛЯ*

Предлагаются алгоритмы оценивания возмущений в системе управления автономного дирижабля. Рассматриваемые алгоритмы предназначены для использования в рамках непрямого адаптивного позиционно-траекторного управления и реализуются непосредственно в процессе функционирования системы управления. Предлагаются алгоритмы оценивания аддитивных внешних возмущений, параметров дирижабля, а также его ускорений. Оценки строятся на базе нелинейной многосвязной модели дирижабля. В работе приводятся результаты численных экспериментов, подтверждающих работоспособность предложенных алгоритмов.

Управление дирижаблями; оценивание возмущений; оценивание параметров.

* Работа поддержана грантом Президента Российской Федерации № НШ-1557.2012.10 и грантом Евросоюза FP 7 «МАТ – многоуровневая транспортная система».

V.Kh. Pshikhopov, M.Yu. Medvedev

ALGORITHMS OF ESTIMATION FOR ROBOTIC AIRSHIP CONTROL SYSTEM

This paper presents algorithms of disturbances estimation for robotic airship control system. The algorithms are to be used in the indirect adaptive position trajectory control systems. The algorithms of additive external disturbances, parameters of airship, and airship accelerations are presented. The estimations are based on a nonlinear model of airship. In this paper computer experiment results are presented.

Control of airship; estimation of disturbances; estimation of parameters.

Введение. В настоящее время интенсивно ведутся исследования, связанные с разработкой различных комплексов на базе воздухоплавательных платформ [1–4]. Активные разработки ведутся в области создания транспортных дирижаблей, стратосферных информационных платформ, средневысотных дирижаблей. Рост интереса к дирижаблям, утраченный в середине прошлого века в связи с авариями, обусловленными использованием водорода, обусловлен возросшей доступностью более безопасных носителей – гелия и флегматизированного водорода. Дирижабль отличается малой энерговооруженностью, что является главным преимуществом по отношению к самолетам и вертолетам. Однако малая потребная энерговооруженность приводит к тому, что дирижабль остается управляемым в смысле Е.С. Пятницкого [5] в малой области переменных состояния. Кроме того, относительно небольшие собственные скорости дирижабля, сравнимые, со скоростью ветра, обуславливают наличие перекрестных сил и моментов, делающих неадекватным предположение о возможности разделения движения на поперечную и продольную составляющую. В этой связи использование классических подходов к синтезу систем управления летательными аппаратами, основанных на линеаризации и разделении движений затруднено. На рис. 1 для дирижабля гибридной формы, представлены проекции сил и моментов $F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z$, действующих на дирижабль в процессе его позиционирования, и сил и моментов $eF_x, eF_y, eF_z, eM_x, eM_y, eM_z$, обусловленных перекрестными связями между продольным и боковым движениями.

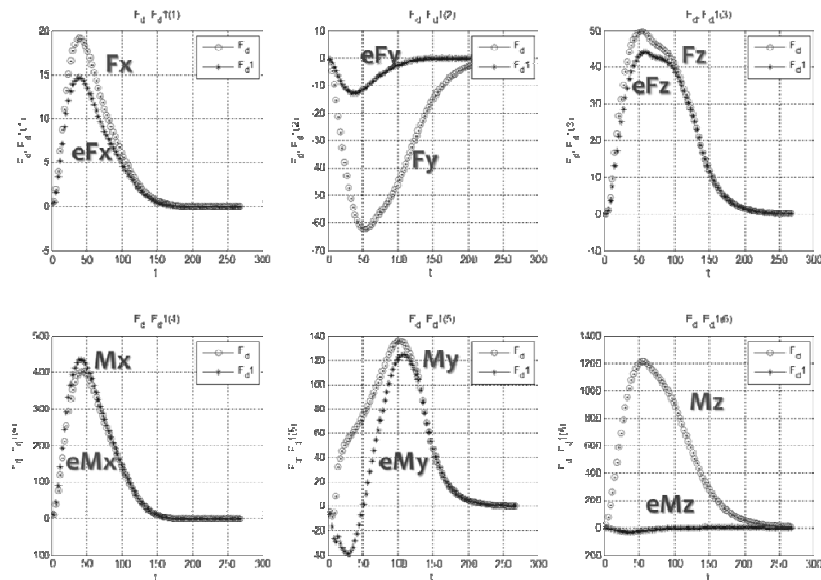


Рис. 1. Полные силы и пренебрегаемые проекции сил и моментов

Как следует из рис. 1 для дирижабля пренебрегаемые силы и моменты достигают 90 % от полных сил и моментов.

Таким образом, для рассматриваемого дирижабля актуальна задача синтеза многосвязной системы управления, для решения которой применяется метод позиционно-траекторного управления [6–8]. Адаптация системы управления осуществляется в рамках идеологии непрямого адаптивного управления [9]. В этой связи актуальной задачей является разработка алгоритмов оценивания для позиционно-траекторной системы управления дирижаблем.

Математическая модель. Для описания дирижабля используются математическая модель, подробно описанная в [1–3], базирующаяся на уравнениях твердого тела:

$$\begin{bmatrix} \dot{\bar{X}}_o \\ \dot{\bar{\Theta}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A^T & 0 \\ 0 & A_\omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V} \\ \bar{\omega} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\bar{V}} \\ \dot{\bar{\omega}} \end{bmatrix} = \tilde{M}^{-1} \begin{bmatrix} \bar{F}_{ynp}(\bar{\delta}) + \bar{F}_{дин}(\bar{r}_T, \bar{V}, \bar{\omega}) + \bar{F}_g(\bar{V}, \bar{\omega}) \\ \bar{N}_{ynp}(\bar{\delta}) + \bar{N}_{дин}(\bar{r}_T, \bar{V}, \bar{\omega}) + \bar{N}_g(\bar{V}, \bar{\omega}) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$T_{им} \dot{\bar{\delta}} + \bar{\delta} = K_{им} \bar{U}, \quad (3)$$

где

$$\bar{\Theta} = \begin{bmatrix} \Psi \\ \vartheta \\ \gamma \end{bmatrix}, \quad \bar{\omega} = \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$\bar{V} = [V_x \quad V_y \quad V_z]^T, \quad \dot{\bar{X}}_o = \dot{\bar{r}}_o = [\dot{x}_o \quad \dot{y}_o \quad \dot{z}_o]^T, \quad (5)$$

где A_ω , A – матрицы кинематики дирижабля; \tilde{M} – матрица массо-инерционных параметров, зависящая от массы дирижабля m , моментов инерции $J_x, J_y, J_z, J_{xy}, J_{xz}, J_{yz}$, присоединенных масс λ_{ij} , $i, j = 1, 6$ и положения центра масс относительно центра объема, характеризуемое вектором $[x^T \quad y^T \quad z^T]^T$; $\bar{F}_{ynp}(\bar{\delta})$, $\bar{N}_{ynp}(\bar{\delta})$ – векторы управляющих сил и моментов; $\bar{F}_g = \bar{G} + \bar{A} + \tilde{R}_A$, $\bar{N}_g = \bar{N}_G + \tilde{N}_A$ – векторы внешних сил и моментов; $\bar{F}_{дин}(\bar{r}_T, \bar{X})$, $\bar{N}_{дин}(\bar{r}_T, \bar{X})$ – векторы динамических сил и моментов дирижабля; $\bar{X} = [\bar{V} \quad \bar{\omega}]^T$; $\bar{\delta}$ – вектор выходных переменных исполнительных механизмов; $T_{им}, K_{им}$ – матрицы постоянных времени и коэффициентов передачи исполнительных механизмов; \bar{U} – вектор управлений; \bar{r}_T – вектор, проведенный из точки расположения геометрического центра дирижабля к центру тяжести $O_{цс}$; Ψ – угол рысканья; ϑ – угол тангажа; γ – угол крена; x_0, y_0, z_0 – координаты геометрического центра дирижабля; $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – проекции вектора угловой скорости дирижабля на оси связанной системы координат; V_x, V_y, V_z – проекции линейной скорости дирижабля на оси связанной системы координат; $\bar{G} = [0 \quad -G \quad 0]^T$, G – вес дирижабля; \bar{N}_G – вектор момента, создаваемого весом дирижабля; $N_{Gx} = (\bar{r}_T \times \bar{G})_x = y_T G_z - z_T G_y$; $N_{Gy} = (\bar{r}_T \times \bar{G})_y = z_T G_x - x_T G_z$; $N_{Gz} = (\bar{r}_T \times \bar{G})_z = x_T G_y - y_T G_x$;

\bar{A} – вектор проекций, создаваемых силой Архимеда; $A_x = a_{12}\rho g U$; $A_y = a_{22}\rho g U$; $A_z = a_{32}\rho g U$; \bar{R}_A – вектор аэродинамических сил; \bar{N}_A – момент аэродинамических сил.

Оценивание возмущений. Существенные неопределенности присутствуют в уравнении динамики (2). Методика проектирования наблюдателя возмущений заключается в следующем [10, 11]. Представим уравнение динамики дирижабля в виде:

$$\begin{bmatrix} \dot{\bar{V}} \\ \dot{\bar{\omega}} \end{bmatrix} = \tilde{M}^{-1} \begin{bmatrix} \bar{F}_{ynp}(\bar{\delta}) + \bar{F}_{dnn}(\bar{r}_r, \bar{V}, \bar{\omega}) + \bar{F}_e(\bar{V}, \bar{\omega}) + \bar{F}_{oc} \\ \bar{N}_{ynp}(\bar{\delta}) + \bar{N}_{dnn}(\bar{r}_r, \bar{V}, \bar{\omega}) + \bar{N}_e(\bar{V}, \bar{\omega}) + \bar{N}_{oc} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\bar{F}}_{oc} \\ \dot{\bar{N}}_{oc} \end{bmatrix} = \tilde{M}^{-1} \begin{bmatrix} g_1(\bar{F}_{oc}) \\ g_2(\bar{N}_{oc}) \end{bmatrix},$$

где $g_1(\bar{F}_{oc}), g_2(\bar{N}_{oc})$ – функции, аппроксимирующие модель неизмеряемых возмущений $\bar{F}_{oc}, \bar{N}_{oc}$, действующих на объект.

Обозначим оценки неизмеряемых векторов $\bar{F}_{oc}, \bar{N}_{oc}$ через $\hat{\bar{F}}_{oc}, \hat{\bar{N}}_{oc}$. Далее вводим вектор ошибок оценивания:

$$\Psi = \begin{bmatrix} \bar{F}_{oc} \\ \bar{N}_{oc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \hat{\bar{F}}_{oc} \\ \hat{\bar{N}}_{oc} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Потребуем, чтобы ошибка Ψ (7) подчинялась решению уравнения

$$\dot{\Psi} + L(\bar{V}, \bar{\omega})\Psi = 0, \quad (8)$$

где $L(\bar{V}, \bar{\omega})$ – матрица, обеспечивающая заданные свойства уравнения (8).

Введем следующую замену переменных:

$$\begin{bmatrix} \hat{\bar{F}}_{oc} \\ \hat{\bar{N}}_{oc} \end{bmatrix} = s(\bar{V}, \bar{\omega}) + \hat{z}, \quad (9)$$

где \hat{z} – вектор новых переменных, $s(\bar{V}, \bar{\omega})$ – произвольная вектор-функция, подлежащая определению в процедуре синтеза наблюдателя.

Продифференцировав (7) в силу уравнений модели (6) из (8) с учетом замены (9) получим уравнение наблюдателя, особенностью которого является использование векторных функций $g_1(\bar{F}_{oc}), g_2(\bar{N}_{oc})$, аппроксимирующих уравнения возмущений. Выберем функции $g_1(\bar{F}_{oc}), g_2(\bar{N}_{oc})$ в виде

$$\begin{bmatrix} g_1(\bar{F}_{oc}) \\ g_2(\bar{N}_{oc}) \end{bmatrix} = G_1 \begin{bmatrix} \bar{F}_{oc} \\ \bar{N}_{oc} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

где G_1 – матрица соответствующей размерности.

В этом случае уравнение для нахождения функции $s(\bar{V}, \bar{\omega})$ принимает вид

$$\frac{\partial s(\bar{V}, \bar{\omega})}{\partial(\bar{V}, \bar{\omega})} = (G_1 + L(\bar{V}, \bar{\omega}))M, \quad (11)$$

С учетом (11) при постоянной матрице L уравнения наблюдателя возмущений принимают вид:

$$\dot{\hat{z}} = -L\hat{z} - L(G_1 + L)M \begin{bmatrix} \bar{V} \\ \bar{\omega} \end{bmatrix} - (G_1 + L) \begin{bmatrix} \bar{F}_{ynp}(\bar{\delta}) + \bar{F}_{дин}(\bar{r}_T, \bar{V}, \bar{\omega}) + \bar{F}_e(\bar{V}, \bar{\omega}) \\ \bar{N}_{ynp}(\bar{\delta}) + \bar{N}_{дин}(\bar{r}_T, \bar{V}, \bar{\omega}) + \bar{N}_e(\bar{V}, \bar{\omega}) \end{bmatrix}, \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{F}_{ou} \\ \hat{N}_{ou} \end{bmatrix} = (G_1 + L)M \begin{bmatrix} \bar{V} \\ \bar{\omega} \end{bmatrix} + \hat{z}. \quad (13)$$

Для аппроксимации возмущений, действующих на дирижабль, целесообразно применять временные ряды. Так при кусочно-постоянной скользящей аппроксимации возмущений матрица G_1 является нулевой матрицей размером 6×6 . Структура наблюдателя возмущений (12), (13) представлена на рис. 2.

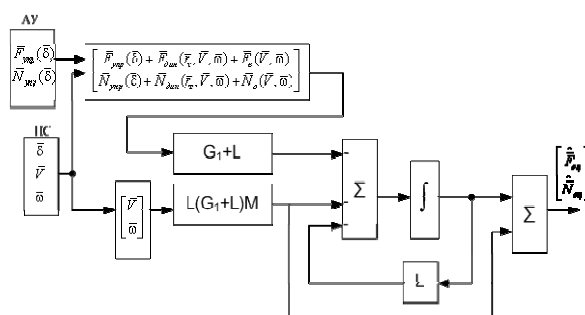


Рис. 2. Структура наблюдателя возмущений

Оценивание неопределенных параметров дирижабля. Масса и положение центра тяжести могут меняться из-за обледенения, намокания, утечек гелия, вследствие чего необходимы алгоритмы оценивания инерционных параметров. Введем допущения: недиагональные присоединенные массы пренебрежимо малы; $J_{xy} = 0$;

$\lambda_{22} = \lambda_{33}, \lambda_{44} = \lambda_{55}$; $x_T = z_T = 0$, $y_T \neq 0$. При выполнении данных предположений из (2) получаем следующую оценку инерционных параметров дирижабля:

$$\begin{bmatrix} m + \lambda_{11} \\ m + \lambda_{22} \\ my_T \\ J_x + \lambda_{44} \\ J_y + \lambda_{55} \\ J_z + \lambda_{66} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{d\hat{V}_x}{dt} & 0 & -\frac{d\hat{\omega}_z}{dt} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{d\hat{V}_y}{dt} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{d\hat{V}_z}{dt} & \frac{d\hat{\omega}_x}{dt} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{d\hat{\omega}_x}{dt} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{d\hat{\omega}_y}{dt} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{d\hat{\omega}_z}{dt} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} \bar{F}_{ynp}(\bar{\delta}) + \bar{F}_{дин}(\bar{r}_T, \bar{V}, \bar{\omega}) + \bar{F}_e(\bar{V}, \bar{\omega}) + \hat{F}_{ou} \\ \bar{N}_{ynp}(\bar{\delta}) + \bar{N}_{дин}(\bar{r}_T, \bar{V}, \bar{\omega}) + \bar{N}_e(\bar{V}, \bar{\omega}) + \hat{N}_{ou} \end{bmatrix}. \quad (14)$$

Ускорения, присутствующие в (14), подаются в алгоритм оценивания либо из навигационной системы, либо оцениваются по известным алгоритмам [12, 13].

Оценки параметров $\begin{bmatrix} m + \lambda_{11} & m + \lambda_{22} & my_T & J_x + \lambda_{44} & J_y + \lambda_{55} & J_z + \lambda_{66} \end{bmatrix}^T$ можно получить только в динамическом режиме (при ускоренном движении).

Оценка (15) требует, чтобы дирижабль двигался с ускорениями по всем линейным и угловым скоростям. Однако реальный дирижабль реализует только движения с малыми или нулевыми угловыми скоростями. Кроме того, ускоренное движение дирижабля обычно осуществляется в одной из плоскостей. Рассмотрим режим ускоренного движения в горизонтальной плоскости. В этом режиме оценка массы и смещения центра масс по вертикальной оси имеют вид:

$$\begin{bmatrix} m \\ my_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{d\hat{V}_x}{dt} & 0 \\ 0 & \frac{d\hat{V}_z}{dt} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} F_{y_{npk}}(\bar{\delta}) + F_{оих}(\bar{r}_T, \bar{V}, \bar{\omega}) + F_{ex}(\bar{V}, \bar{\omega}) + \hat{F}_{оих} - \lambda_{11} \frac{d\hat{V}_x}{dt} - \lambda_{13} \frac{d\hat{V}_z}{dt} \\ N_{y_{npk}}(\bar{\delta}) + N_{оих}(\bar{r}_T, \bar{V}, \bar{\omega}) + N_{ex}(\bar{V}, \bar{\omega}) + \hat{N}_{оих} - \lambda_{14} \frac{d\hat{V}_x}{dt} - \lambda_{34} \frac{d\hat{V}_z}{dt} \end{bmatrix}. \quad (15)$$

Оценка (15) позволяет определить массу m и параметр y_T в режиме прямолинейного ускоренного движения дирижабля.

Моделирование процессов оценивания. Применим следующую аппроксимацию внешних возмущений, обеспечивающую астатизм первого порядка в наблюдателе:

$$\dot{z}_1(t) = z_2, \quad \dot{z}_2(t) = 0, \quad F = z_1, \quad (16)$$

где $z_1(t)$, $z_2(t)$ – переменные состояния; F – выход модели возмущения.

При такой аппроксимации матрица G_1 имеет вид

$$G_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (17)$$

Так как на дирижабль непосредственно воздействует только переменная z_1 , то модель возмущений дополняется уравнениями выхода

$$\begin{bmatrix} \bar{F}_{оц} \\ \bar{N}_{оц} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} z = C_n z, \quad (18)$$

где z – полный вектор состояния модели описывающей возмущения.

Тогда уравнение наблюдателя возмущений (12) принимает вид

$$G_1 z - (G_1 + L) C^{-1} \left(\begin{bmatrix} \bar{F}_{ynp}(\bar{\delta}) + \bar{F}_{dun}(\bar{r}_T, \bar{V}, \bar{\omega}) + \bar{F}_e(\bar{V}, \bar{\omega}) \\ \bar{N}_{ynp}(\bar{\delta}) + \bar{N}_{dun}(\bar{r}_T, \bar{V}, \bar{\omega}) + \bar{N}_e(\bar{V}, \bar{\omega}) \end{bmatrix} + C_n z \right) - \dot{\hat{z}} + L(z - s(\bar{V}, \bar{\omega}) - \hat{z}) = 0. \quad (19)$$

Матрица L имеет размеры 12×12 , ее структура имеет блочный вид

$$L = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -l_{21} & -l_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -l_{34} & -l_{44} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \dots & & & & \dots & & & & \dots & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -l_{1211} & -l_{1212} & 0 \end{bmatrix}. \quad (20)$$

Характеристическое уравнение наблюдателя с собственной матрицей вида (20) принимает вид

$$D(s) = (s^2 + l_{22}s + l_{21})(s^2 + l_{44}s + l_{43}) \dots (s^2 + l_{1212}s + l_{1211}). \quad (21)$$

Выбор коэффициентов l_{ij} осуществляется для каждого блока в отдельности.

В частности, задав время переходного процесса 0,1 с, получим, используя стандартные передаточные функции с настройкой на технический оптимум:

$$\begin{aligned} l_{22} = l_{44} = l_{66} = l_{88} = l_{1010} = l_{1212} &= 95, \\ l_{21} = l_{43} = l_{65} = l_{87} = l_{109} = l_{1211} &= 2256,25. \end{aligned} \quad (22)$$

На рис. 3 представлены результаты моделирования наблюдателя (19) в системе управления дирижаблем при аппроксимации возмущений выражениями (17), (18).

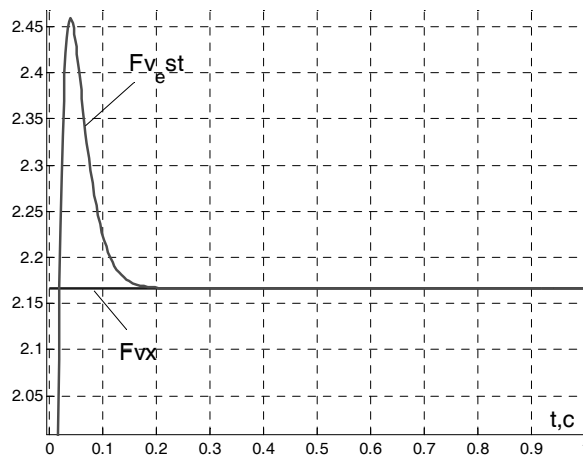


Рис. 3. Оценка ветрового возмущения дирижабля

Заключение. В работе предложен метод оценивания аддитивных возмущений и инерционных параметров воздухоплавательной платформы. Метод позволяет строить адаптивные системы управления подвижными объектами на основе

непрямого адаптивного управления. Метод эффективен в условиях, когда скорость изменения возмущений ограничена нормой переменных состояния. При оценке параметров принята гипотеза квазистационарности. При невыполнении указанных ограничений необходимо использовать робастные методы построения систем управления, например, описанные в [14].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Пшихопов В.Х.* Дирижабли: перспективы использования в робототехнике // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2004. – № 5. – С. 15-20.
2. *Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю. и др.* Управление воздухоплавательными комплексами: теория и технологии проектирования. – М.: Физматлит, 2010. – 394 с.
3. *Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю., Сиротенко М.Ю., Носко О.Э., Юрченко А.С.* Проектирование систем управления роботизированных воздухоплавательных комплексов на базе дирижаблей // Известия ТРТУ. – 2006. – № 3 (58). – С. 160-167.
4. *Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю.* Структурный синтез автопилотов подвижных объектов с оцениванием возмущений // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2006. – № 1. – С. 103-109.
5. *Пятницкий Е.С.* Управляемость классов лагранжевых систем с ограниченными управлениями // Автоматика и телемеханика. – 1996. – № 12. – С. 29-37.
6. *Пшихопов В.Х.* Позиционно-траекторное управление подвижными объектами. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. – 183 с.
7. *Пшихопов В.Х.* Управление подвижными объектами в априори неформализованных средах // Известия ЮФУ. Технические науки. – Таганрог, 2008. – № 12. – С. 6-19.
8. *Пшихопов В.Х.* Аттракторы и репеллеры в конструировании систем управления подвижными объектами // Известия ТРТУ. – 2006. – № 3 (58). – С. 49-57.
9. *Земляков С.Д., Рутковский В.Ю.* О некоторых результатах развития теории и практики применения беспойсковых адаптивных систем // Автоматика и телемеханика. – 2001. – № 7.
10. *Медведев М.Ю.* Алгоритмы адаптивного управления исполнительными приводами // Мехатроника, автоматизация и управление. – 2006. – № 6. – С. 17-22.
11. *Медведев М.Ю., Пшихопов В.Х., Сиротенко М.Ю.* Алгоритмы адаптивного управления судном на воздушной подушке // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2008. – № 1 (78). – С. 189-194.
12. *Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю.* Алгоритмическое обеспечение робастных асимптотических наблюдателей производных // Инженерный вестник Дона. – 2011. – № 2.
13. *Медведев М.Ю.* Структура и алгоритмическое обеспечение нелинейного наблюдателя производных в условиях действия случайных шумов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2008. – № 12 (89). – С. 20-25.
14. *Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю.* Блочный синтез робастных систем при ограничениях на управления и координаты состояния // Мехатроника, автоматизация и управление. – 2011. – № 1. – С. 2-8.

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

Пшихопов Вячеслав Хасанович – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: pshichop@gambler.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371694; кафедра электротехники и мехатроники; зав. кафедрой; д.т.н.

Медведев Михаил Юрьевич – e-mail: medvmihal@gmail.com; кафедра электротехники и мехатроники; д.т.н.; профессор.

Pshikhopov Vyacheslav Khasanjvich – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: pshichop@rambler.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371694; the department of electrical engineering and mechatronics; head the department; dr. of eng. sc.

Medvedev Mikhail Yur'evich – e-mail: medvmihal@gmail.com; the department of electrical engineering and mechatronics; dr. of eng. sc.; professor.