очень сложными [6], поскольку прошли путь интуитивного обобщения и согласования с опытом. Соответственным образом должны строиться формальные модели поиска решений. В данной работе показана роль выделения и использования стационарных инвариантов графов – деревьев кратчайших путей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Иванов Д.С.* Управление цепями поставок. – СПб.: Изд-во политехн. ун-та, 2009.
2. *Розенберг И.Н., Беляков С.Л.* Программные интеллектуальные оболочки геоинформационных систем. – М.: Научный мир, 2010.
3. *Берштейн Л.С., Беляков С.Л., Боженюк А.В.* Использование нечетких темпоральных графов для моделирования в ГИС // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 1 (126). – С. 121-127.
4. *Кристофидес Н.* Теория графов. Алгоритмический подход. – М.: Мир, 1978.
5. *Ерусалимский Я.М., Скороходов В.А.* Графы с вентильной достижимостью. Марковские процессы и потоки в сетях // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естесственные науки. – 2003. – № 3. – С. 3-5.
6. *Люггер Д.Ф.* Искусственный интеллект: стратегии и методы решения сложных проблем: Пер. с англ. – 4-е изд. – М.: Вильямс, 2005

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.Е. Золотовский.

Беляков Станислав Леонидович – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: beliacov@yandex.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371743; кафедра прикладной информатики; д.т.н.; профессор.

Боженюк Александр Витальевич – e-mail: avb002@yandex.ru; кафедра прикладной информатики; д.т.н.; профессор.

Beliacov Stanislav Leonidovich – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: beliacov@yandex.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371743; the department of applied information science; dr. of eng. sc.; professor.

Bozhenyuk Alexandr Vitalievich – e-mail: avb002@yandex.ru; the department of applied information science; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 681.513

В.Х. Пшихопов, А.Р. Гайдук, М.Ю. Медведев, В.Е. Беляев, Н.К. Полуянович, Ю.П. Волощенко

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕЕ УПРАВЛЕНИЕ ТЯГОВЫМИ ПРИВОДАМИ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА*

Рассматривается задача оптимизации движения электроподвижного состава по критерию энергопотребления с использованием комплексной математической модели, включающей уравнения механического движения и уравнения электромеханического и электрических преобразователей энергии. Приводится методика планирования движения состава вдоль, пути, заданного прямолинейными отрезками различных наклонов. Методика демонстрируется численным примером. На базе комплексной модели строятся алгоритмы управления, реализующие заданную оптимального траекторию движения. Погрешности модели учитываются в системе управления путем оценивания возмущений в процессе движения.

Электроподвижный состав; энергосбережение оценивание возмущений.

* Работа поддержана грантом РФФИ № 12-08-13112-офи_м_РЖД.

V.Kh. Pshikhopov, A.R. Gaiduk, M.Yu. Medvedev, V.E. Belyaev, N.K. Poluyanovich, Yu.P. Voloshchenko

POWER SAVING CONTROL FOR ELECTRICAL TRAIN

This paper presents power saving control for electrical trains. The problem is solved on base of a complex mathematical model. The model describes mechanical movement of train, electromechanical drives, electrical convertors, and power grid. Method of planning of optimal train movement is proposed. The numerical example is presented. On base of the complex model the optimal control is designed. Adaptation of the control system is based on asymptotical robust estimators of disturbances. The results of computer simulation is presented.

Electrical train; estimation of disturbances; power saving.

Введение. Актуальность проблемы управления электроподвижным составом обусловлена интенсивным развитием силовой электроники, приводной техники, повышением скоростей движения и необходимостью энергосбережения [1]. Развитие технических средств позволяет повысить уровень автоматизации, в связи с чем в настоящее время имеется возможность использовать для управления тяговыми приводами электропоездов современные методы и алгоритмы управления [2–4], включая современные методы построения оптимального управления [5–8].

При построении системы автоматического управления движением, в том числе, электропоезда целесообразно применять иерархическую структуру управления, включающую уровень планирования движения, тактический уровень управления и уровень управления исполнительными механизмами [3].

С точки зрения энергосбережения эффект может быть достигнут на любом из перечисленных уровней системы управления. Так, на уровне исполнительных механизмов достижение энергосберегающего эффекта возможно как за счет применения более эффективных преобразователей, так и за счет управления, обеспечивающего соответствующие режимы работы. Однако наиболее существенный эффект может быть получен на уровне планирования движения при учете не только механических, но и электрических процессов.

В данной работе рассматривается решение задачи движения электропоезда при движении вдоль пути с заданным профилем.

Экономичное управление подвижным составом. Предположим, профиль пути из пункта А в пункт В известен и имеет вид приведенный на рис. 1. Он имеет возвышение на h_1 м и понижение на h_2 м, но понижение меньше повышения, т.е. $h_2 < h_1$. Предположим также, что известна средняя скорость V_0, при которой состав (электровоз + вагон) преодолевает путь из А в В за заданное время с учетом времени на разгон и остановку поезда.

При движении по возвышенности с постоянной скоростью V_0, очевидно при подъёме придется увеличивать тягу, т.е. затрачивать дополнительную энергию, а при спуске тормозить, тоже затрачивая дополнительную энергию. При этом исключается возможность преобразования высокой потенциальной энергии состава, полученной им на подъёме, в его кинетическую энергию.

Такое преобразование станет возможным, если только на вершине скорость состава будет меньше V_0. Таким образом, если состав будет двигаться с переменной скоростью, появляется возможность экономии энергии, так как в этом случае указанную потенциальную энергию состава можно без потерь преобразовать в его кинетическую энергию движения. Однако, из-за того, что в данном случае $h_2 < h_1$ после проезда возвышенности скорость состава окажется меньше требуемой V_0,

что приведет к опозданию. С тем, чтобы исключить это, необходимо сообщить составу дополнительную кинетическую энергию. Наиболее целесообразным представляется это сделать на участке пути до вершины подъема.

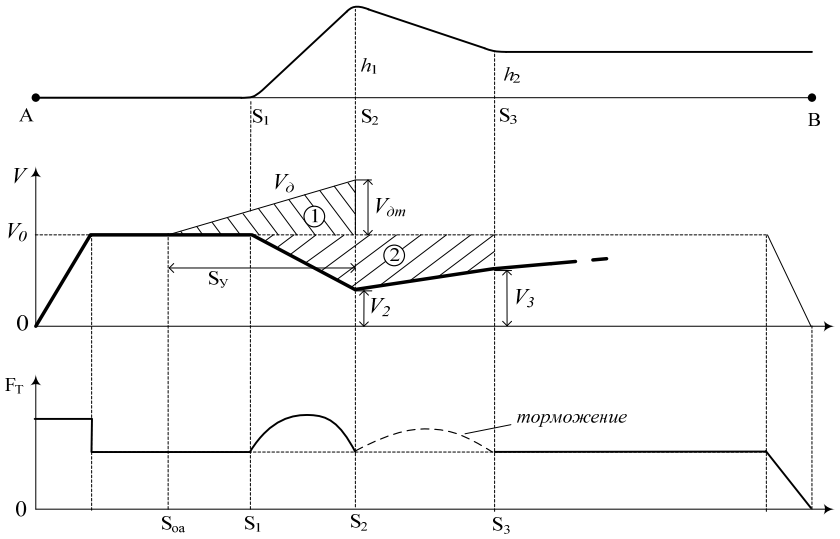

Рис. 1. Графики профиля пути, скорости и тяги

Итак, возникает задача определения дополнительного ускорения и длины пути, на котором составу можно сообщить такое количество энергии, при котором не только его скорость в конце спуска будет равна требуемой V_0, но и средняя скорость прохождения возвышенности будет тоже равна V_0.

Если тягу не менять на всем участке $S_1 - S_3$, то скорость состава будет изменяться так, как показано на рис. 1 жирной линией. Как видно на участке $S_1 - S_2$ она будет падать до значения V_2, а затем возрастать до значения V_3. Если считать массу состава сосредоточенной в точке, то кинетическая энергия в точке S_2, из-за перехода её в потенциальную, будет равна $E_2 = mV_0^2 - mgh_1 = mV_2^2$. Следовательно, скорость состава равна

$$V_2 = \sqrt{V_0^2 - gh_1}\,. \tag{1}$$

Примем, что выполняется условие

$$gh_1 < V_0^2\,. \tag{2}$$

На участке $S_2 - S_3$ происходит обратное преобразование энергий, поэтому в точке S_3 скорость

$$V_3 = \sqrt{V_2^2 + g(h_1 - h_2)}\,. \tag{3}$$

Или

$$V_3 = \sqrt{V_0^2 - gh_2}\,. \tag{4}$$

Таким образом, скорость состава в точке S_3, как и средняя скорость участке $S_1 - S_3$, будут меньше требуемой V_0.

В данной работе предлагается сохранять эти скорости равными V_0, за счет придания дополнительного постоянного ускорения α составу на участке, предшествующем точке S_2. Обозначим S_y расстояние, на котором действует это ускорение. Дополнительное возрастание скорости состава $V_{\partial m}$ показано на рис. 1. Значение этой величины в конце пути S_y определяется известным равенством

$$V_{\partial m} = \sqrt{V_0^2 + 2\alpha S_y} - V_0 . \tag{5}$$

Для того чтобы выполнялись указанные выше условия необходимо выбрать S_y и α так, чтобы, согласно рис. 1, выполнялись следующие условия:

а) приращение скорости состава за счет ускорения, должно быть равно потери скорости из-за разности высот h_1 и h_2, т.е. согласно (5)

$$\sqrt{V_0^2 + 2\alpha S_y} - V_0 = V_0 - V_3 ; \tag{6}$$

б) площадь P_y (на рис. 1 она обозначена цифрой 1) должна быть равна площади $P_{\text{п}}$ (на рис. 1 она обозначена цифрой 2):

$$P_y = P_{\text{п}} . \tag{7}$$

Согласно рис. 1 площадь P_y определяется выражением

$$P_y = \frac{1}{2}\left(\sqrt{V_0^2 + 2\alpha S_y} - V_0\right) S_y . \tag{8}$$

Из равенства (6) получаем $2\alpha S_y = 3V_0^2 - 4V_0V_3 + V_3^2$ и, подставляя в (8), приходим к выражению

$$P_y = \frac{1}{2}\left(\sqrt{(2V_0 - V_3)^2} - V_0\right) S_y = \frac{1}{2}(V_0 - V_3) S_y . \tag{9}$$

Аналогично, согласно рис. 1, имеем

$$P_{\text{п}} = \frac{V_0 - V_2}{2}(S_2 - S_1) + \frac{2V_0 - V_2 - V_3}{2}(S_3 - S_2) .$$

Отсюда

$$P_{\text{п}} = \frac{1}{2}\left[V_0(2S_3 - S_1 - S_2) - V_2(S_3 - S_1) - V_3(S_3 - S_2)\right] . \tag{10}$$

Наконец, подставляя равенства (9) и (10) в (7), получим

$$\frac{1}{2}(V_0 - V_3) S_y = \frac{1}{2}\left[V_0(2S_3 - S_1 - S_2) - V_2(S_3 - S_1) - V_3(S_3 - S_2)\right] .$$

Отсюда

$$S_y = \frac{1}{(V_0 - V_3)}\left[V_0(2S_3 - S_1 - S_2) - V_2(S_3 - S_1) - V_3(S_3 - S_2)\right] . \tag{11}$$

С учетом выражения (11) из равенства (6) выводим

$$\alpha = \frac{1}{2S_y}[3V_0^2 - 4V_0V_3 + V_3^2] . \tag{12}$$

Полученные выражения (11) и (12) дают решение поставленной задачи. Приведем численный пример применения этих соотношений.

Пусть профиль пути соответствует рис. 1, причем $S_1 = 2000$ м, $S_2 = 2300$ м, $S_3 = 2500$ м, $h_1 = 30$ м, $h_2 = 15$ м, $V_0 = 20$ м/с, $g = 10$ м / с^2. Необходимо найти S_y (м), α (м/с^2), при которых скорость в конце спуска, а также средняя скорость прохождения возвышенности будут равны V_0. Оценить расход энергии.

Согласно (1) и (4) $V_2 = \sqrt{20^2 - 10 \cdot 30} = 10$ м/с, $V_3 = \sqrt{20^2 - 10 \cdot 15} = 15,81$ м/с, а $V_2 - V_3 = -5,81$ м/с. При этом по формуле (11) имеем $S_y = 1393$ м, а по формуле (12) находим $\alpha = 0,06645$ м/с^2. Следовательно, если ускорение состава заканчивается в точке S_2, то точка O_a начала ускорения состава имеет координату $S_{oa} = S_2 - S_y = 2300 - 1393 = 907$ м.

Легко установить, что средние скорости на участках и времена их прохождения равны: $S_{oa} - S_1 \to \overline{V}_{01} = 21,65$ м/с, $t_{01} = 50,427$ с; $S_1 - S_2 \to \overline{V}_{12} = 15,056$ м/с, $t_{12} = 15,056$ с; $S_2 - S_3 \to \overline{V}_{23} = 18,25$ м/с, $t_{23} = 10,959$ с. Поэтому средняя скорость на этих участках равна

$$\overline{V}_{o3} = \frac{S_3 - S_{oa}}{t_{01} + t_{12} + t_{23}} = \frac{1593}{76,436} = 20,84 \text{ м/с},$$

т.е. погрешность не превышает 5 %.

Таким образом, за счет движения состава с переменной скоростью и дополнительных затрат энергии на придание составу местного ускорения, обеспечено поддержание заданной средней скорости движения состава на всем пути, исключая участки разгона и торможения.

На придание составу местного ускорения дополнительно затрачено энергии в объеме

$$E_\partial = mg\,h_2 = 150 \cdot m\,.$$

Если бы скорость поддерживалась постоянной и при прохождении возвышенности, то на преодоление подъема на $h_1 = 30$ м со скоростью $V_0 = 20$ м/с была бы затрачена энергия

$$E_{12} = mg\,h_1 = 300 \cdot m\,.$$

Кроме того, на торможение состава на спуске между S_2 и S_3 потребовалась бы энергия равная изменению потенциальной энергии на этом участке, т.е. $E_{23} = mg(h_1 - h_2) = 10 \cdot (30 - 15)m = 150m$. Допустим, половина этой энергии ($75m$) обеспечивается работой сил сопротивления движению, а вторая половина тоже ($75m$) обеспечивается активным торможением. Тогда полные затраты энергии на поддержание постоянной скорости движения состава будут равны $375m$. Следовательно, при движении с переменной скоростью экономия составит

$$\eta = \frac{375m - 150m}{375m} = \frac{225}{375} = 0,6\,,$$

т.е. 60 %. С учетом конкретных условий, ряда не учтенных потерь и того, что состав имеет некоторую длину, эффект, конечно, будет ниже, но все же довольно существенным.

Система управления движением. Для реализации описанного выше движения состава можно применить адаптивную систему управления, схема которой приведена на рис. 2.

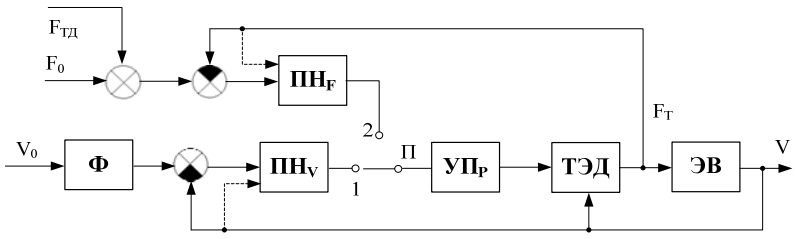

Рис. 2. Система управления движением

Предполагается, что тяговый электродвигатель постоянного тока (ТЭД), представленный на рис. 3, питается от управляемого преобразователя (УПр), обеспечивающего такие напряжения на двигателе, при которых ток якоря I_a изменяется плавно и не превышает допустимых значений.

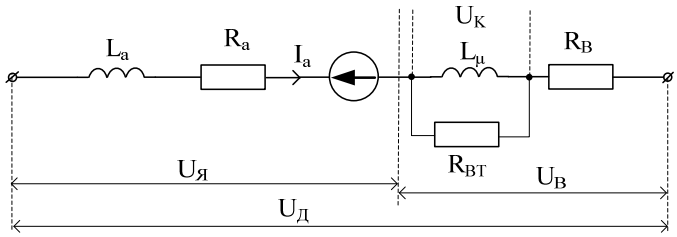

Рис. 3. Схема тягового двигателя ТЛ-2К1

Уравнения двигателя ТЛ-2К1 с последовательным возбуждением с учетом управляемого преобразователя УПр имеют вид [1]:

$$L_a\dot{I}_a = -(R_a + R_{\text{в}} + R_{\text{вт}})I_a - i_p C_e \Phi(I_\mu) R_k^{-1} V + R_{\text{вт}} I_\mu + K_{\text{упр}} U_{\text{п}}. \quad (13)$$

$$L_\mu \dot{I}_\mu = (I_a - I_\mu) R_{\text{вт}}. \quad (14)$$

$$L_\mu = 2pw_в \frac{d\Phi(I_\mu)}{dI_\mu},\ F_{\text{т}} = C_e \Phi(I_\mu) I_a i_p / R_k, \quad (15)$$

где $R_a = 0,0317 + 0,0356 = 0,0673$ Ом, $L_a = 0,11$ – индуктивность якорной обмотки; $R_{\text{в}} = 0,025$ Ом,; $R_{\text{вт}} = 0,005$ Ом; $C_e = 2,31$; функция $\Phi(I_\mu)$ В×с/рад определена в работе [1]; $i_p = 3,826$ – передаточное отношение редуктора; $p = 2$ – число пар полюсов ТЭД; $w_{\text{в}} = 350$ – число витков обмотки возбуждения; V – скорость состава м/с, U_∂ – напряжение на двигателе; $R_k = 0,625$ м – радиус колес электровоза, $F_{\text{т}}$ – сила тяги электровоза.

Система имеет два регулятора скорости ПИ$_V$ и тяги ПИ$_F$, а также фильтр Ф, который предназначен для плавного ввода изменения заданной скорости движения состава. Согласно [9] это звено второго порядка с передаточной функцией

$$W_\phi(p) = \frac{1}{T_1 T_2 p^2 + (T_1 + T_2)p + 1}, \quad (16)$$

где $T_1 = 2$ с, $T_2 = 1,5$ с.

В схеме имеется переключатель П регуляторов. Так как профиль пути и масса состава m известны, то расчет величин S_y и α а также дополнительной тяги $F_{т\partial} = \alpha m$ выполняется перед стартом или во время движения до точки S_{oa}.

Уравнения движения состава имеют вид:

$$\dot{x}_1 = x_3, \tag{17}$$

$$m_1\dot{x}_3 = -c(x_1 - x_2) - \mu(x_3 - x_4) + F_т + W_{01}(x_3) + W_{\partial 1}(x_1), \tag{18}$$

$$\dot{x}_2 = x_4, \tag{19}$$

$$m_2\dot{x}_4 = c(x_1 - x_2) + \mu(x_3 - x_4) + W_{02}(x_4) + W_{\partial 1}(x_2), \tag{20}$$

где $m_1 = 120$ т и $m_2 = 71$ т – массы электровоза и вагона;

$$W_{01}(x_3) = (1,9 + 0,01x_3 + 0,0003x_3^2)G_1,\ W_{\partial 1}(x_1) = m_1 g \sin\delta(x_1), \tag{21}$$

$$W_{02}(x_4) = (0,7 + \frac{8 + 0,1x_4 + 0,0025x_4^2}{17,75})Q_2,\ W_{\partial 2}(x_2) = m_2 g \sin\delta(x_2), \tag{22}$$

$$\delta(x_i) = \begin{cases} -|\delta(x_i)|, & \textit{при движении вверх по склону}, \\ |\delta(x_i)|, & \textit{при движении вниз по склону}. \end{cases}$$

Здесь $|\delta(x_i)|$ – острый угол наклона профиля пути в точке с координатой x_i, по горизонтальной оси; x_3, x_4 – скорости электровоза и вагона соответственно в км/ч. $G_1 = m_1 g = 120 \cdot 10 = 1200$ кН. $Q_2 = m_2 g = 71 \cdot 10 = 710$ кН.

Значения коэффициента с и μ определяются интерполяцией по таблицам или по выражения приведенным в [9].

При разгоне состава и движении с постоянной скоростью (участок до точки S_{oa}) переключатель П находится в положении 1. Система работает в режиме стабилизации скорости. На этом интервале фиксируется сила тяги F_0, которая определяется весом состава и сопротивлением движению данного состава по горизонтальному пути с заданной скоростью V_0. При достижении точки S_{oa} переключатель П переводится в состояние 2 в результате чего в систему включается регулятор силы тяги, на его вход поступает сумма $F_{т\partial} + F_0$. В этом положении переключатель П остается до прохождении точки S_2, после чего он переводится снова в положение 1. В результате в положении 2 переключателя П система управления на расстоянии S_y будет сообщать составу дополнительное ускорение α, благодаря чему к моменту прохождения составом точки S_3, его средняя скорость прохождения участка $S_{0a} - S_3$ и текущая скорость будут равны заданной V_0. Это обеспечит прибытие состава в пункт В в заданное время.

Расчет коэффициента передачи регулятора по скорости. В результате линеаризации в окрестности $V_0 = 20$ м/с получены значения нелинейных функций: $W_{01} = 3977,76$ Н; $W_{02} = 1324,6$ Н; $F_{т0} = 5302,4$ Н; $I_{a0} = 90$ А; $U_{\partial 0} = 613$ В.

Уравнения в отклонениях тягового двигателя имеют вид:

$$(p + 63,9)\Delta F_т(p) = -1308,32\Delta V(p) + 16,7\Delta I_\mu(p) + 3339,12\Delta U_\partial(p),$$

$$(p + 3,33)\Delta I_\mu(p) = 3,33\Delta I_a(p),\ \Delta F_т(p) = 36,73\Delta I_a(p),$$

или

$$(0,3p^2+64,2p+63,45)\Delta F_{\text{т}}(p)=-1308,32\Delta V(p)+3339,12\Delta U_{\partial}(p)\,. \qquad (23)$$

Уравнения в отклонениях для состава:

$$(p^2+5,5p)\Delta V(p)=8,33\cdot 10^{-6}\Delta F_{\text{т}}(p)+f(p)\,, \qquad (23)$$

где $f(p)$ – изображение всех сил сопротивления движению, зависящих от профиля пути.

Объединив уравнения (23) и (24) и промоделировав замкнутую систему, найдем, что при ПИ$_V$-регуляторе в виде $\Delta U=3500(V_0-V)$ переходной процесс имеет длительность около 8 с и не имеет перерегулирования.

Коэффициент передачи регулятора по тяге ПИ$_F$ (см. рис. 2) подбирается в режиме управления по моменту.

Заключение. Предложенный метод позволяет решать задачу энергосберегающего управления движением состава, исходя из известного профиля пути. На основе предложенного подхода можно сформировать программную траекторию движения, которая может корректироваться в соответствии с текущим состоянием системы. Например, если в результате действия возмущений и погрешностей средняя скорость состава отличается от требуемой, то на следующие участи движения производится коррекция скорости движения.

Для повышения точности управления, учета нелинейностей, входящих в уравнения движения состава, и адаптации синтезируемой системы управления к неопределенным параметрам, возмущениям можно также использовать нелинейные методы управления движением и различные методы оценивания [10].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Бахвалов Ю.А., Зарифьян А.А., Кашников В.Н., Колпахчьян П.Г., Плохов Е.М., Янов В.П.* Моделирование электромеханической системы электровоза с асинхронным тяговым приводом. – М.: Транспорт, 2001.
2. *Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю.* Структурный синтез автопилотов подвижных объектов с оцениванием возмущений // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2006. – № 1. – С. 103-109.
3. *Пшихопов В.Х.* Позиционно-траекторное управление подвижными объектами. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. – 183 с.
4. *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.
5. *Пшихопов В.Х.* Оптимально по быстродействию траекторное управление электромеханическими манипуляционными роботами // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2007. – № 1. – С. 51-57.
6. *Медведев М.Ю.* Синтез замкнутых оптимальных по быстродействию управлений каскадными нелинейными динамическими системами с ограничениями на координаты // Мехатроника, автоматизация и управление. – 2009. – № 7. – С. 2-6.
7. *Медведев М.Ю.* Синтез субоптимальных управлений нелинейными многосвязными динамическими системами // Мехатроника, автоматизация и управление. – 2009. – № 12. – С. 2-8.
8. *Гайдук А.Р., Капустян С.Г., Шаповалов И.О.* Оптимальное перемещение тела интеллектуальным роботом // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2009. – № 7. – С. 43-46.
9. *Пудовиков О.Е.* Управление длинносоставными тяжеловесными грузовыми поездами // Управление большими системами. – 2011. – Вып. 29. – С. 214-231.
10. *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.

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@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.

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.

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 Yurij 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 «MAT – многоуровневая транспортная система».