



## Оценивание нелинейных возмущений высокого порядка в адаптивных алгоритмах позиционно-траекторного управления

*В.А. Шевченко, М.Ю. Медведев, В.Х. Пшихопов*

*Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону*

**Аннотация.** В работе представлен адаптивный алгоритм позиционно-траекторного управления с эталонной моделью и контуром оценивания нелинейных неизмеряемых возмущений. Введение робастного наблюдателя производных в базовый регулятор позиционно-траекторного управления, построенного по принципам самонастраивающихся адаптивных систем с эталонной моделью, позволяет оценивать неизмеряемые возмущения, характеризующиеся нелинейностью второго порядка и выше, и адаптировать параметры системы для уменьшения или сведения к нулю ошибки рассогласования между объектом управления и эталонной моделью. Применение наблюдателя производных позволяет повысить общую устойчивость системы управления, в ином случае, система теряет устойчивость при краткосрочном влиянии возмущающего воздействия высокого порядка на объект управления.

**Ключевые слова:** адаптивное управления, эталонная модель, позиционно-траекторное управление, наблюдатель, оценка параметров, подвижный объект, АНПА.

### Введение

Адаптивное управление с эталонной моделью основано на принципе отслеживания сигнала рассогласования, который определяется как разница между выходными значениями параметров состояния объекта управления и некоторой идеализированной (эталонной) модели, в случае, когда динамические характеристики модели и объекта управления не идентичны. Сигнал рассогласования подается на вход механизма настройки параметров, который подстраивает регулятор таким образом, что сигнал рассогласования уменьшается или сводится к нулю. Такой метод прямого адаптивного управления был предложен в работах Л.Д. Ландау, Б. Куо, Г. Франклина и др. [1-3], продолжает исследоваться и в настоящее время [4-6], находя применение в разрабатываемых системах управления подвижными объектами разного рода [7-8].



Применение самонастраивающихся адаптивных систем управления с эталонной моделью, построенных на базе позиционно-траекторного метода, позволяют обеспечить устойчивость системы во время переходных процессов и влияния возмущающих воздействий. Исследование адаптивной системы, представленной в [9], показывает хороший результат подавления внешних возмущений, в том числе неизмеряемых, при условии их линейности. Неизмеряемое нелинейное возмущение высокого порядка характеризуется быстрым накоплением сигнала рассогласования (ошибки регулирования), что в условиях даже краткосрочного влияния, в некоторых случаях, приводит к неустойчивому состоянию системы и к расхождению процесса регулирования. Влияние такого возмущения на объект управления может быть нивелировано введением в регулятор робастного наблюдателя производных, способного оценить уровень неизмеряемого воздействия и адаптировать параметры системы.

### Синтез управления

Рассмотрим модель подвижного объекта на базе уравнений кинематики и динамики твердого тела с учетом влияния неизмеряемого возмущения и его оценки [9]:

$$\begin{aligned} \dot{y} &= R(y)x, \\ \dot{x} &= M^{-1} \left( F_u + F_d + (f_{idmv} - \hat{f}_{idmv}) \right), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $y$  – вектор линейных и угловых положений подвижного объекта во внешней системе координат;  $x$  – вектор линейных и угловых скоростей подвижного объекта в связанной системе координат;  $R(y)$  – матрица кинематики;  $M$  – матрица инерционных параметров;  $F_u$  – вектор управляющих сил и моментов;  $F_d$  – вектор прочих сил и моментов, действующих на

---



подвижный объект;  $f_{idnv}$  – вектор внешнего или параметрического неизмеряемого возмущения;  $\hat{f}_{idnv}$  – оценка вектора неизмеряемых возмущений.

Наряду с моделью (1) рассмотрим номинальную модель вида:

$$\begin{aligned} \dot{y}_m &= R(y_m)x_m, \\ \dot{x}_m &= M^{-1}(F_{um} + F_{dm}), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $y_m$  – вектор линейных и угловых положений номинальной модели во внешней системе координат;  $x_m$  – вектор линейных и угловых скоростей номинальной модели в связанной системе координат;  $R(y_m)$  – матрица кинематики номинальной модели;  $F_{um}$  – вектор управляющих сил и моментов номинальной модели;  $F_{dm}$  – вектор прочих сил и моментов, действующих на номинальную модель.

Матрица  $R(y_m)$  и вектор  $F_{dm}$  совпадают по структуре с матрицей  $R(y)$  и вектором  $F_d$  соответственно.

Синтезируем управление для эталонной модели (2) в соответствии с процедурой, описанной в [10]. Введем в рассмотрение ошибку управления в виде:

$$e_m = A_1 y_m + A_2, \quad (3)$$

Потребуем, чтобы вектор (3) удовлетворял эталонному дифференциальному уравнению:

$$\ddot{e}_m + T_2 \dot{e}_m + T_1 e_m = 0, \quad (4)$$

Подставим выражения (3) в уравнение (6) и решим его относительно вектора управляющих сил и моментов  $F_{um}$ :

$$F_{um} = -F_{dm} + (A_1 R(y_m) M^{-1})^{-1} \{-A_1 \dot{R}(y_m) x_m - T_2 \dot{e}_m - T_1 e_m\}. \quad (5)$$

Система уравнений (2), с учетом (5) образует эталонную модель подвижного объекта, которая имеет вид:



$$\begin{cases} \dot{y}_m = R(y_m)x_m, \\ \dot{x}_m = (A_1R(y_m))^{-1}(-A_1\dot{R}(y_m)x_m - T_2\dot{e}_m - T_1e_m). \end{cases} \quad (6)$$

Проведем синтез контура управления подвижным объектом. Для этого введем в рассмотрение ошибку регулирования в виде:

$$e = A_1y - A_1y_m + B_1z_1 + B_2z_2, \quad (7)$$

$$\dot{z}_1 = z_2, \quad \dot{z}_2 = A_1y - A_1y_m, \quad (8)$$

где  $z_1, z_2$  – векторы дополнительных переменных;  $B_i, i=1,2$  – матрицы произвольных коэффициентов настройки регулятора.

Подставим уравнения (7) – (8) в дифференциальное уравнение вида (4) для объекта управления, получим алгебраическое уравнение, решив которое, выразим вектор управляющих сил и моментов:

$$F_u = -F_d - (f_{idnv} - \hat{f}_{idnv}) + (A_1RM^{-1})^{-1} * \left\{ -A_1\dot{R}x + A_1\dot{R}_m x_m + A_1R_m \dot{x}_m - B_1(A_1y - A_1y_m) - B_2(A_1R(y)x - A_1R(y_m)x_m) - T_2\dot{e} - T_1e \right\}. \quad (9)$$

Тогда контур управления подвижным объектом описывается уравнениями:

$$\begin{cases} \dot{y} = R(y)x, \\ \dot{x} = M^{-1} \cdot (f_{idnv} - \hat{f}_{idnv}) + (A_1R)^{-1} \left\{ -A_1\dot{R}x + A_1\dot{R}_m x_m + A_1R_m \dot{x}_m - B_1(A_1y - A_1y_m) - B_2(A_1R(y)x - A_1R(y_m)x_m) - T_2\dot{e} - T_1e \right\}. \end{cases} \quad (10)$$

Проведем синтез робастного наблюдателя в соответствии с [10]. Введем ошибку наблюдения, как разницу между реальным значением воздействия и его оценкой  $\hat{f}_{idnv}$ :

$$e_n = f_{idnv} - \hat{f}_{idnv} \quad (11)$$

В соответствии с процедурой синтеза редуцированных наблюдателей определим уравнение оценки наблюдений следующим образом:

$$\hat{f}_{idnv} = S(x) + \hat{z} \quad (12)$$



где  $S(x)$  – неизвестная вектор-функция, подлежащая определению,  $\hat{z}$  – вектор новых переменных.

Тогда ошибку наблюдения (4) с учетом (5) можно записать, как:

$$e_n = f_{idnv} - S(x) - \hat{z} \quad (13)$$

Производная от ошибки  $e_n$  примет вид  $\dot{e}_n = \dot{f}_{idnv} - \frac{\partial S}{\partial x} \dot{x} - \dot{\hat{z}}$  (7).

Для обеспечения асимптотической сходимости оценки, потребуем, чтобы ошибка  $e_n$  удовлетворяла эталонному дифференциальному уравнению:

$$\dot{e}_n + a_1 \cdot e_n = 0 \quad (14)$$

Подставив (11) – (13) в уравнение (14), получим:

$$-\frac{\partial S}{\partial x} (M^{-1} (F_u + F_d + f_{idnv})) - \dot{\hat{z}} + a_1 (f_{idnv} - S(x) - \hat{z}) = 0 \quad (15)$$

Определение неизвестной функции  $S(x)$  необходимо производить из расчета, чтобы уравнение (9) не зависело от неизмеряемого воздействия  $f_{idnv}$ , таким образом, уравнение (15) будет описывать асимптотический наблюдатель. При этом оценка неизмеряемой величины  $\hat{f}_{idnv}$  будет определяться в соответствии с (12). Чтобы (15) не зависило от  $f_{idnv}$ , все слагаемые, содержащие этот множитель, приравняем к нулю и определим  $S(x)$ :

$$-\frac{\partial S}{\partial x} (M^{-1} \cdot f_{idnv}) + a_1 \cdot f_{idnv} = 0 \quad (16)$$

$$\frac{\partial S}{\partial x} = a_1 \cdot (M^{-1})^{-1} = a_1 \cdot M \quad (17)$$

$$S(x) = a_1 \cdot M \cdot x \quad (18)$$

Перепишем (15) и (12) с учетом (17), (18) и выразим производную вектора новых переменных  $\dot{\hat{z}}$  и оценку  $\hat{f}_{idnv}$ :

$$-Ma_1(M^{-1}(F_u + F_d)) - \dot{\hat{z}} - a_1^2 Mx - a_1 \hat{z} = 0 \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \dot{\hat{z}} = & -Ma_1(M^{-1}(-\hat{f}_{idnv})) + \\ & +(A_1 \cdot R(y))^{-1} \{ -T_2 \dot{e}_m - T_1 e_m - B_1(A_1 y - A_1 y_m) - B_2(A_1 R(y)x - A_1 R(y_m)x_m) - T_2 \dot{e} - T_1 e \} - a_1^2 Mx_m - a_1 \hat{z} \end{aligned} \quad (14)$$



$$\hat{f}_{div} = a_1 Mx + \hat{z} \quad (15)$$

Уравнения (14), (15) являются уравнениями наблюдателя, и в совокупности с системами уравнений (6), (8), (10) составляют математическую модель системы адаптивного управления с эталонной моделью и контуром оценивания неизмеряемых возмущений.

### Моделирование

Для моделирования системы управления автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА) воспользуемся данными, представленными в работе [9]. Основным параметрам регулятора заданы следующие значения:  $T_1 = 0,25I$ ,  $T_2 = I$ ,  $A_1 = I$ ,  $A_2 = -[10+t \ 10 \ 10 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ ,  $B_1 = 10I$ ,  $B_2 = 25I$ , где  $I$  – единичная матрица размерностью  $6 \times 6$ .

Проведем моделирование работы системы адаптивного управления с эталонной моделью, при условии влияния неизмеряемого возмущения высокого порядка на объект управления, для двух случаев – с наблюдателем производных, введенным в базовый регулятор, и без наблюдателя производных.

Траектория движения АНПА при воздействии нелинейного, постоянно нарастающего возмущения формы:

$$F_{div} = 20 \cdot (0, 2F_d^0 + [5+t^2 \ -3+\sin(0,5 \cdot t)+t^3 \ 2+\cos(0,4t)+t^2 \ 0 \ 0 \ 0]^T)$$

где  $F_d^0 = 0,5spV^2[-c_x \ c_y \ c_z \ m_x l \ m_y l \ m_z l]^T$ ;

представлена на рис.1 – 2,а, линейная скорость АНПА представлена на рис.2,б. На графиках сплошной линией показана характеристика объекта управления (АНПА), пунктирной линией показана характеристика эталонной модели.

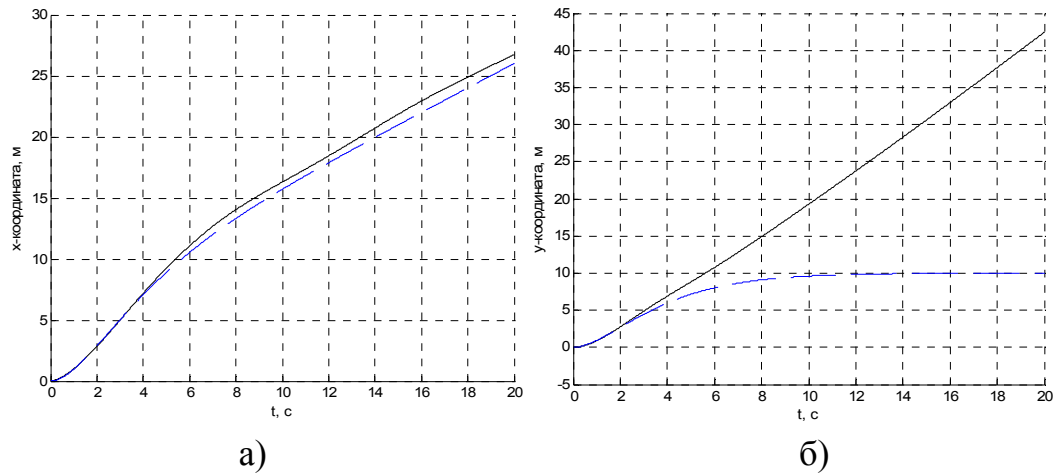


Рис. 1. – Линейные положения АНПА: а) по оси X; б) по оси Y.

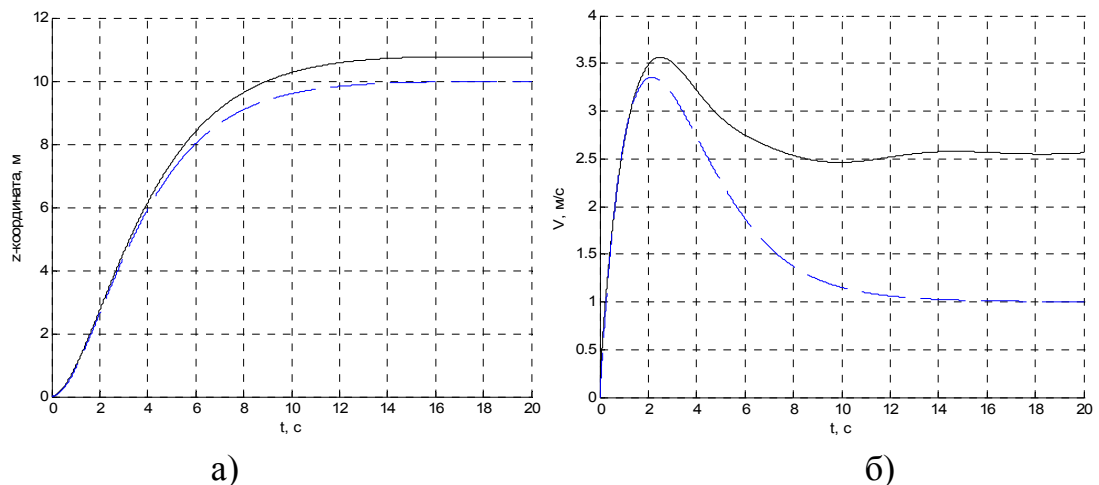


Рис. 2. – а) линейное положение АНПА по оси Z; б) линейная скорость АНПА.

Таким образом, сравнивая полученные результаты с результатами моделирования в работе [9], можно сделать вывод, что адаптивный алгоритм управления с эталонной моделью обеспечивает высокую степень адаптации к внешним возмущениям, при условии их линейной природы, а в случае, даже, краткосрочного воздействия возмущений нелинейного характера второй степени и выше, система теряет устойчивость (рис.3).

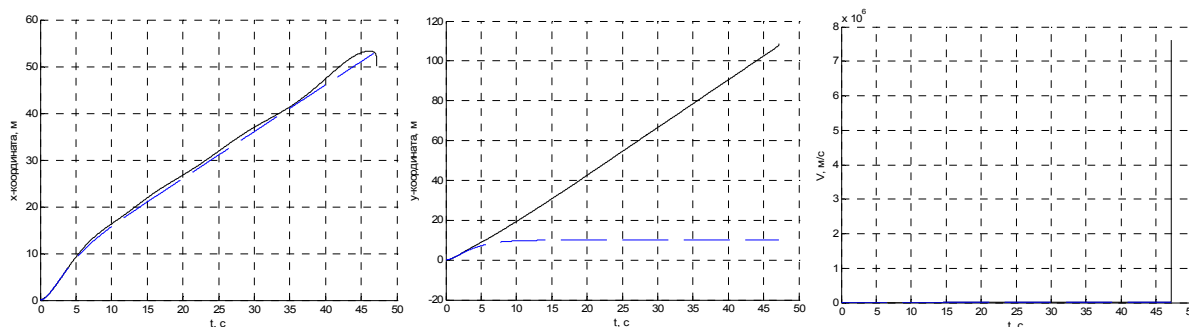


Рис. 3. – Характеристики АНПА при длительном воздействии нелинейного возмущения

Применение робастного наблюдателя производных обеспечивает оценку и, при условии наличия достаточной мощности исполнительных механизмов для нивелирования внешних воздействий, адаптацию к внешним возмущениям. Результат работы системы управления с контуром оценивания внешних возмущений представлен на рис.4 – 5. Данные результаты подтверждают повышение устойчивости системы управления (процесс регулирования не расходится), а так же демонстрируют высокую степень слежения за параметрами эталонной модели и отработки задачи управления. При влиянии постоянно нарастающего воздействия второго порядка сигнал рассогласования не превышает 0.01% в установившемся режиме, при влиянии постоянно нарастающего воздействия третьего порядка сигнал рассогласования не превышает 2 % в установившемся режиме.

### Заключение

В данной работе представлен алгоритм прямого адаптивного управления с эталонной моделью на базе позиционно-траекторного метода. Исследование синтезированного алгоритма показывает высокую степень адаптации к неизмеряемым внешним возмущениям линейного характера, но при условии воздействия нелинейного возмущения второго порядка и выше, система управления быстро накапливает сигнал рассогласования и в краткосрочной



перспективе теряет устойчивость. Для того, что бы избежать влияния внешних возмущений на устойчивость системы и качество регулирования, в базовый регулятор введен робастный наблюдатель производных. Моделирование системы управления с контуром оценивания неизмеряемых возмущений высокого порядка, представленное на рис.4 – 5, подтверждает работоспособность алгоритма и его эффективность.

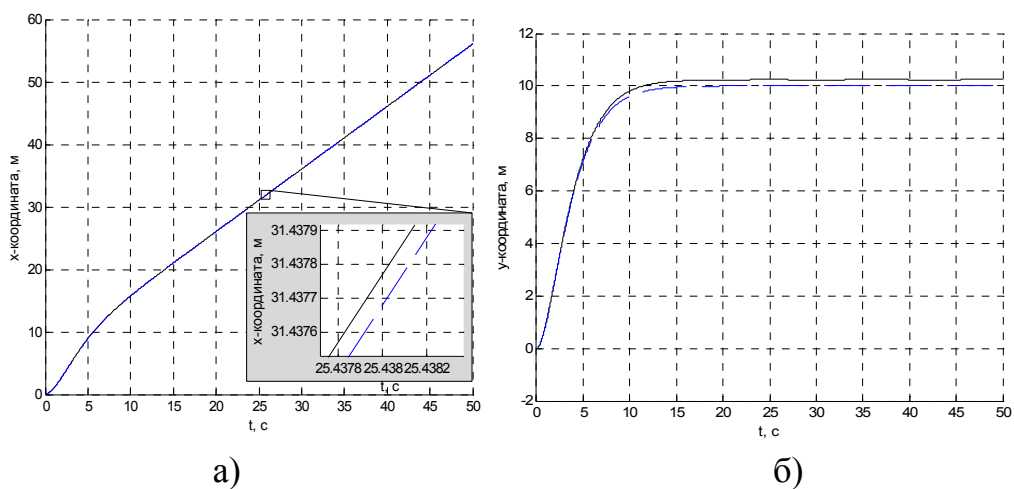


Рис. 4. – Линейные положения АНПА при оценке внешних возмущений: а) по оси X; б) по оси Y.

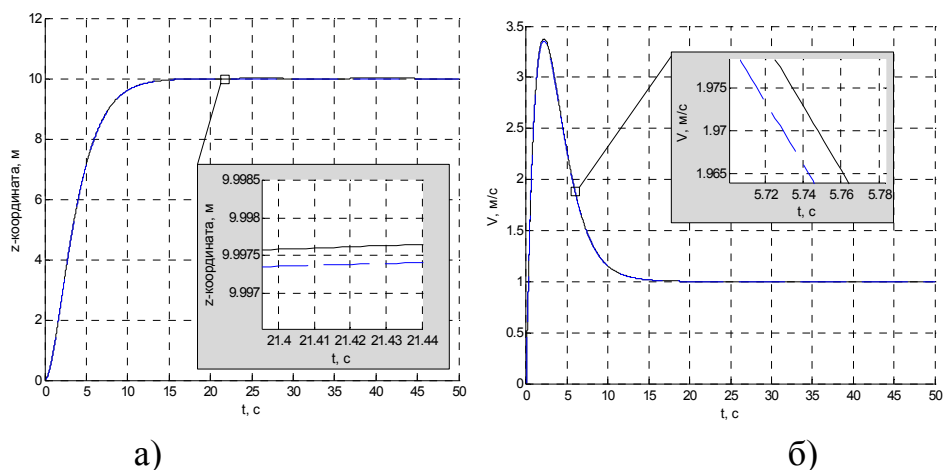


Рис. 5. – Характеристики АНПА при оценке внешних возмущений: а) линейное положение АНПА по оси Z; б) линейная скорость АНПА.



### Литература

1. I. D. Landau, Control and Systems Theory, Vol. 8: Adaptive Control. New York: Marcel Dekker, 1969, 176 p.
2. B. C. Kuo, Automatic Control Systems. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1962, 143 p.
3. G. F. Franklin, J. D. Powell, Digital Control of Dynamic Systems. Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1980, 230 p.
4. В. Ю. Рутковский, В. М. Глумов, В. М. Суханов Физически реализуемый алгоритм адаптивного управления с эталонной моделью // Автоматика и телемеханика. 2011, № 8, С. 96–108.
5. С. Д. Земляков, В. Ю. Рутковский. Алгоритм функционирования адаптивной системы с эталонной моделью, гарантирующий заданную динамическую точность управления нестационарным динамическим объектом в условиях неопределенности // Автоматика и телемеханика. 2009, № 10, С. 35–44
6. В. М. Глумов, С. Д. Земляков, В. Ю. Рутковский, В. М. Суханов Применение принципа построения адаптивных систем с эталонной моделью к задачам мониторинга текущего состояния трансмиссионных валов // Автоматика и телемеханика. 2003, № 5, С. 131–146.
7. Бронников А.М. Способы реализации адаптивной системы управления с идентификатором и эталонной моделью//В сборнике: XII всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014 Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. 2014. С. 264-275.
8. Пшихопов В.Х., Федотов А.А., Медведев М.Ю., Медведева Т.Н., Гуренко Б.В. Позиционно-траекторная система прямого адаптивного управления морскими подвижными объектами // Инженерный вестник Дона, 2014, № 3 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2014/2496/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2014/2496/).



9. Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю., Крухмалев В.А. Базовые алгоритмы адаптивного позиционно-траекторного управления подвижными объектами при позиционировании в точке // Мехатроника, автоматизация, управление. 2015. Т. 16. № 4. С. 219-225.

10. Медведев М.Ю., Шевченко В.А. Оценка возмущений в процессе автоматического регулирования синхронного генератора // Инженерный вестник Дона, 2013, № 4 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1930.

### References

1. I. D. Landau, Control and Systems Theory, Vol. 8: Adaptive Control. New York: Marcel Dekker, 1969, 176 p.

2. B. C. Kuo, Automatic Control Systems. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1962, 143 p.

3. G. F. Franklin, J. D. Powell, Digital Control of Dynamic Systems. Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1980, 230 p.

4. V. Yu. Rutkovskiy, V. M. Glumov, V. M. Avtomatika i telemekhanika. 2011, № 8, pp. 96–108.

5. S. D. Zemlyakov, V. Yu. Rutkovskiy. Avtomatika i telemekhanika. 2009, № 10, pp. 35–44.

6. V. M. Glumov, S. D. Zemlyakov, V. Yu. Rutkovskiy, V. M. Sukhanov. Avtomatika i telemekhanika. 2003, № 5, pp. 131–146.

7. Bronnikov A.M. V sbornike: XII vserossiyskoe soveshchanie po problemam upravleniya VSPU.2014 Institut problem upravleniya im. V.A. Trapeznikova RAN. 2014. pp. 264-275.

8. Pshikhopov V.Kh., Fedotov A.A., Medvedev M.Yu., Medvedeva T.N., Gurenko B.V. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2014, № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2014/2496/.



9. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu., Krukhmalev V.A. Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie. 2015. T. 16. № 4. pp. 219-225.

10. Medvedev M.Yu., Shevchenko V.A. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2013, № 4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1930](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1930).