

УДК 517.977.5

**Компьютерное моделирование автоматических систем управления с
внешними возмущениями**

Смирнов Михаил Николаевич

кандидат физико-математических наук,
доцент, Санкт-Петербургский государственный университет,
г. Санкт-Петербург

Смирнова Мария Александровна,

кандидат физико-математических наук,
старший преподаватель, Санкт-Петербургский государственный
университет,
г. Санкт-Петербург

Аннотация. Современные системы автоматического управления позволяют снизить возможность возникновения аварий из-за человеческого фактора, более экономно расходовать энергетические ресурсы, точно следовать по заданным маршрутам, огибать различные препятствия с учетом особенностей судов, компенсировать влияние действующих на них внешних возмущений и т.д. Важным показателем качества управления является длительность переходного процесса, которая напрямую связана со степенью устойчивости рассматриваемой системы: чем ближе степень устойчивости к нулю, тем медленнее завершается переходный процесс. В связи с этим возникает ряд задач, связанных с построением систем автоматического управления движением, а именно, минимизация времени совершения маневра и расхода топлива, построение оптимальных траекторий движения, подавление различных видов внешних воздействий. В статье представлена компьютерная модель системы автоматического управления движением для компенсации внешних возмущений. Также представлен программный код, реализующий формирование автоматической системы управления. Для

проверки качества сформированной модели и управления проведено компьютерное моделирование динамики конкретного объекта управления.

Ключевые слова: управление, система, устойчивость, морские объекты

Computer simulation of automatic control systems with external disturbances

Smirnov Mikhail Nikolaevich

candidate of physical and mathematical sciences,
associate professor, St.Petersburg State University,
St.Petersburg

Smirnova Maria Aleksandrovna

candidate of physical and mathematical sciences,
senior lecturer, St.Petersburg State University,
St.Petersburg

Annotation. Modern automatic control systems make it possible to reduce the possibility of accidents due to the human factor, use energy resources more economically, follow precisely set routes, avoid various obstacles taking into account the characteristics of ships, compensate for the influence of external disturbances acting on them, etc. An important indicator of the quality of management is the duration of the transition process, which is directly related to the degree of stability of the system under consideration: the closer the degree of stability to zero, the slower the transition process is completed. In this regard, a number of tasks arise related to the construction of automatic motion control systems, namely, minimizing maneuver time and fuel consumption, building optimal motion trajectories, suppressing various types of external influences. The article presents a computer model of an automatic motion control system to compensate for external disturbances. The program code implementing the formation of an automatic control system is also presented. To check the quality of

the computer model and control, computer simulation of the dynamics of a specific control object was carried out.

Keywords: control, system, stability, marine vessel

Современные системы автоматического управления позволяют снизить возможность возникновения аварий из-за человеческого фактора, более экономно расходовать энергетические ресурсы, точно следовать по заданным маршрутам, огибать различные препятствия с учетом особенностей судов, компенсировать влияние действующих на них внешних возмущений и т.д. Важным показателем качества управления является длительность переходного процесса, которая напрямую связана со степенью устойчивости рассматриваемой системы: чем ближе степень устойчивости к нулю, тем медленнее завершается переходный процесс. В связи с этим возникает ряд задач [1-12], связанных с построением систем автоматического управления движением, а именно, минимизация времени совершения маневра и расхода топлива, построение оптимальных траекторий движения, подавление различных видов внешних воздействий.

В данной статье представлена компьютерная модель для реализации движения морского судна при действии внешних возмущений.

Для компьютерной реализации системы автоматического управления использован математический пакет MATLAB и его подсистема Simulink. Написан соответствующий программный модуль, осуществляющий поиск коэффициентов закона автоматического управления, исходя из предъявляемых к нему требований.

Рассмотрим отдельные фрагменты программного кода, отвечающие основным этапам алгоритма формирования компенсирующего управления.

Ниже приведен фрагмент исходного кода (Листинг 1) на языке MATLAB, выполняющий построение характеристического полинома матрицы замкнутой системы как функции параметров α и γ .

Для решения уравнения Ляпунова

$$AP+PA^T-\gamma BB^T+\alpha P+\alpha^{-1}HH^T=0, P>0.$$

использованы возможности MATLAB для работы с символьными выражениями, представленные функциями **sym**, **simplify**, **subs**, **collect**, **solve**.

Листинг 1

```
% Линейная модель
A = [a11 a12 0 b1; a21 a22 0 b2; 0 1 0 0; 0 0 0 0];
B = [0; 0; 0; 1];
C = eye(4);
H = [hd1; hd2; 0; 0];

% Вводим символьные переменные
alpha = sym('alpha');
gamma = sym('gamma');
p{ij} = sym('p{ij}');

% Левая часть уравнения Ляпунова (3.1.9)
Lyap = simplify(A*P + P*A' - gamma*B*B' + alpha*P + (1/alpha)*H*H');

% Решение уравнения (3.1.9)
P_ag(i,j) = solve(Lyap(i,j),p{ij});

% Вектор коэффициентов регулятора как функция параметров alpha и gamma
K = -gamma*B'*inv(P_ag);
```

Листинг 2

```
% Задаем вспомогательный вектор g
g11 = 1;
g12 = 1;
g21 = 1;
g22 = 1;

% Задаем степень устойчивости
alpha_bound = 0.06;

% Вспомогательные переменные
a11_d = 2* alpha_bound *(g11^2);
a21_d = 2* alpha_bound *(g21^2);
```

```

a21_d =2* alpha_bound *(g21^2);

a10_d = alpha_bound ^2+(g11^2)* alpha_bound +g12^2;

a20_d = alpha_bound ^2+(g21^2)* alpha_bound +g22^2;

% Полином с желаемой степенью устойчивости alpha_bound

delta_bound = collect(expand((s^2+a11_d*s+a10_d)*(s^2+a21_d*s+a20_d)));

```

построение полинома с заданной степенью устойчивости **alpha_bound**.

Листинг 3 демонстрирует решение задачи минимизации

$$\min_{\alpha, \gamma > 0} \text{tr}(CP(\alpha, \gamma)C^T)$$

на множестве допустимых значений α и γ **Dop_set** с использованием функции **searchmin**. В свою очередь, **Dop_set** находится при помощи встроенной в MATLAB функции **fsolve**.

Листинг 3

```

% Получаем коэффициенты полиномов, считая переменной s

[c,t] = coeffs(Xar_zamk,s);

[c1,t1] = coeffs(delta_bound,s);

% Генерируем коэффициенты при соответствующих степенях и

% записываем их в переменные

for i=0:1:4

    var = find(t==s^i);

    str = ['coeff' num2str(i) '=c(var);'];

    str1 = ['coeff_d' num2str(i) '=c1(var);'];

    eval(str)

    eval(str1)

end

% Начальная точка в задаче минимизации

x0 = [1 ; 100000];

```

```

% Решение задачи минимизации

options=optimset('Display','iter','MaxFunEvals',1000,'TolFun',0.001);

% Находим множество Dop_set допустимых alpha и gamma

Dop_set = fsolve(@(x) [subs(koeff0-
koeff_d0,{alpha,gamma},{x(1),x(2)});...

                    subs(koeff1-
koeff_d1,{alpha,gamma},{x(1),x(2)});...

                    subs(koeff2-
koeff_d2,{alpha,gamma},{x(1),x(2)});...

                    subs(koeff3-
koeff_d3,{alpha,gamma},{x(1),x(2)});...

                    subs(koeff4-
koeff_d4,{alpha,gamma},{x(1),x(2)});...

                    ],x0,options)

% На множестве Dop_set находим оптимальные alpha и gamma

x =
searchmin(@(x) (trace(C*P_ag*C')), {alpha,gamma}, {x(1),x(2)}, Dop_set, x0)

% Строим вектор коэффициентов регулятора

K = -x(2)*B'*subs(inv(P_ag), {alpha,gamma}, {x(1),x(2)})

```

Кроме программной поддержки вычислений в среде MATLAB в работе осуществлялось имитационное моделирование динамических процессов в замкнутой системе с использованием подсистемы Simulink, являющейся частью интегрированной среды MATLAB.

Выполнение имитационного моделирования осуществляется для проверки качества сформированного закона управления, анализа свойств динамической системы и визуализации различных динамических процессов таких, как отклонение рулей, изменение курса и угловой скорости и других параметров, за изменением которых нам необходимо наблюдать. Компьютерное моделирование является неотъемлемой частью создания всех систем автоматического управления, поскольку позволяет проводить тестирование системы управления в любых, даже самых неблагоприятных

условиях, что, в свою очередь, помогает избежать аварийных ситуаций в реальности. Также Simulink позволяет имитировать различного рода внешние воздействия и анализировать реакцию системы на их действие.

В процессе исследования была построена Simulink-модель системы управления, общая схема которой изображена на рис. 1.

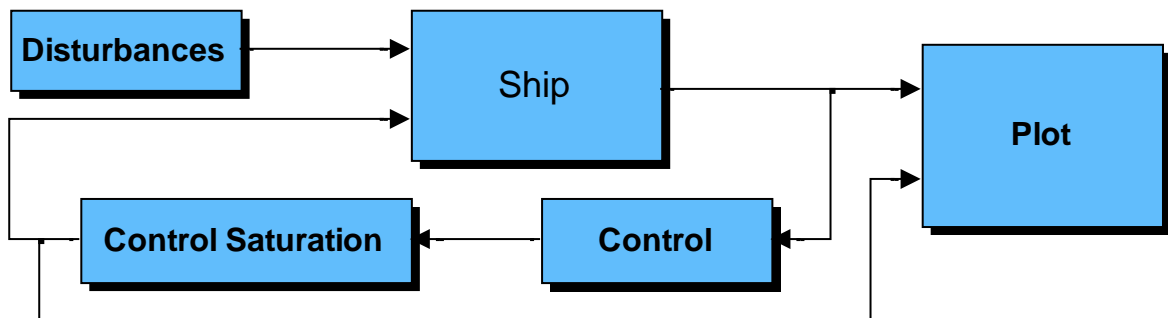


Рис. 1. Общая схема Simulink-модели системы

Построенная Simulink-модель объединяет в себе следующие блоки:

- блок **Ship** – объект управления;
- блок **Control** – центральное устройство формирования управляющего сигнала;
- блок **Control Saturation** – корректировка управляющего сигнала с учетом технических ограничений объекта управления;
- блок **Disturbances** – внешнее воздействие;
- блок **Plot** – визуализация динамических процессов.

Рассмотрим подробнее каждый из этих блоков.

1. Блок **Ship** моделирует динамику движения морского судна. Он имеет два входа, представляющие собой внешнее возмущение $d(t)$ и управляющее воздействие $u(t)$. Выходом блока является выход системы $y(t)$.

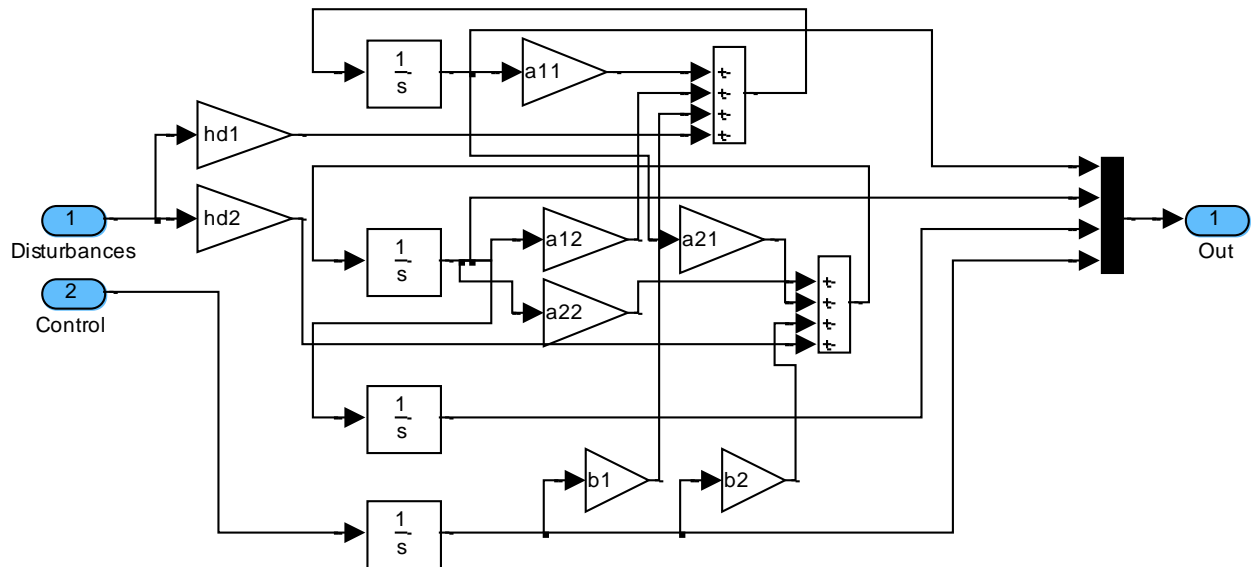


Рис. 2. Блок Ship

2. Блоки **Control** и **Control Saturation** в совокупности реализуют закон управления, используя найденный при помощи MATLAB вектор K коэффициентов регулятора $u = k_1\beta + k_2\omega + k_3\phi + k_4\delta$. Входом для блока **Control** служит вектор $y(t)$ выхода системы

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu + Hd(t), \\ y &= Cx. \end{aligned}$$

3. На выходе из него получаем управляющий сигнал, который в соответствии с техническими ограничениями, уникальными для каждого объекта, при помощи функции **Saturation** преобразуется по следующему правилу:

$$u(t) = \begin{cases} 3, & \text{если } u(t) > 3^\circ/\text{сек}, \\ u(t), & \text{если } |u(t)| \leq 3^\circ/\text{сек}, \\ -3, & \text{если } u(t) < -3^\circ/\text{сек}. \end{cases}$$

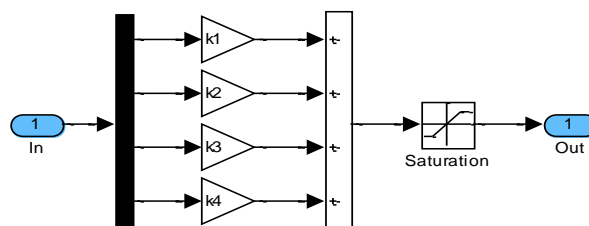


Рис. 3. Совокупность блоков Control и Control Saturation

4. Блок **Disturbances** определяет внешние возмущения, обусловленные порывами ветра и морским волнением. Выходом блока **Disturbances** является вектор внешних воздействий $d(t)$, который затем поступает на вход блока **Ship**. Элемент библиотеки Simulink **Signal Builder** позволяет формировать любое внешние воздействие.

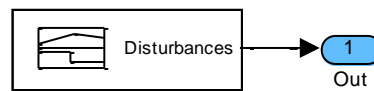


Рис. 4. Блок Disturbances

5. Блок **Plot** визуализирует изменение курса $\phi(t)$ морского судна, отклонение вертикальных рулей $\delta(t)$ и закон управления $u(t)$. Схема данного блока представлена на рис. 5.

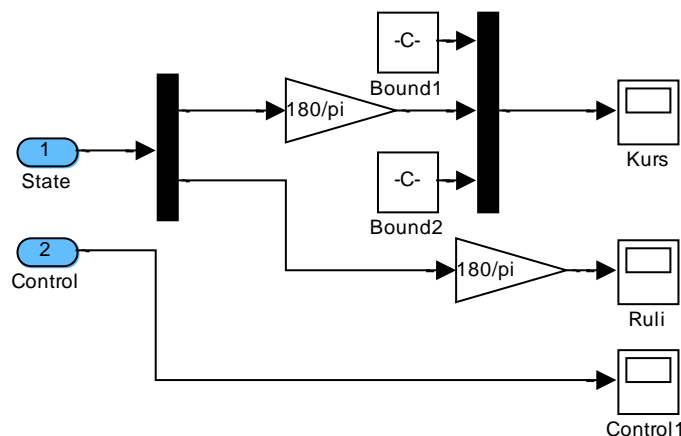


Рис. 5. Блок Plot

Рассмотрим результат компьютерного моделирования, полученный в результате запуска данной компьютерной программы для морского судна водоизмещением 6000 т. Пусть внешнее возмущение имеет вид, представленный на графике (см. рис. 6) и характеризуется резким изменением направления воздействия на морское судно.

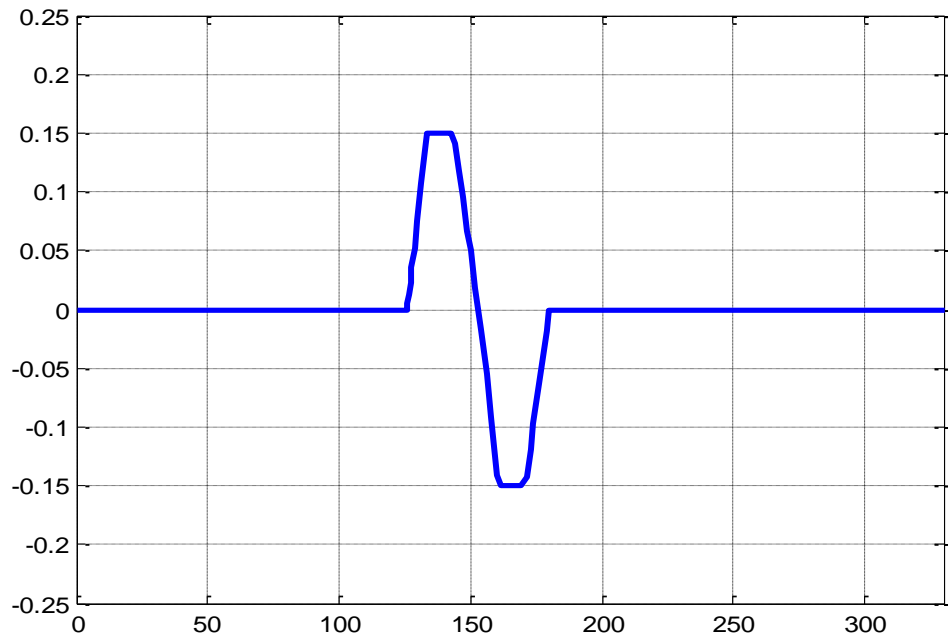


Рис. 6. Ограниченное внешнее возмущение

Изменение курса и отклонение рулей представлены соответствующими графиками на рис. 7 и 8 соответственно.

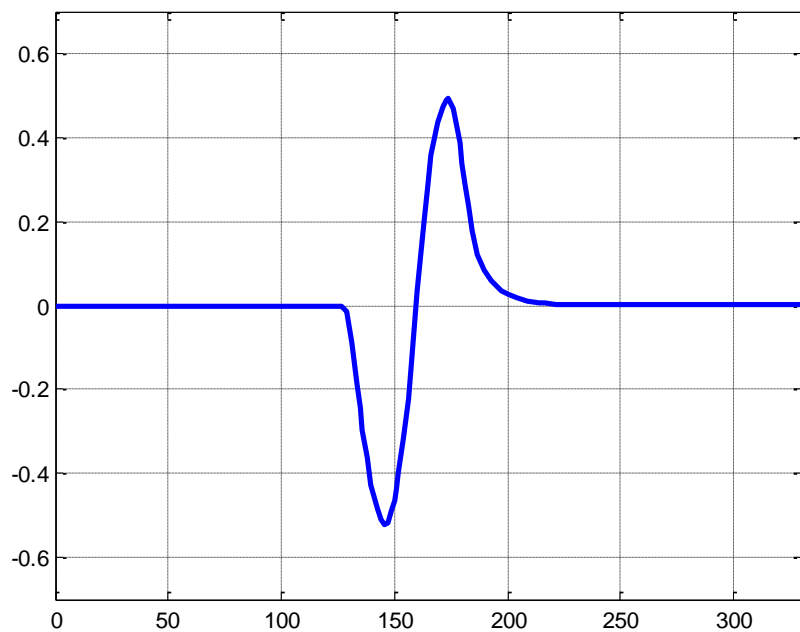


Рис. 7. Изменение курса

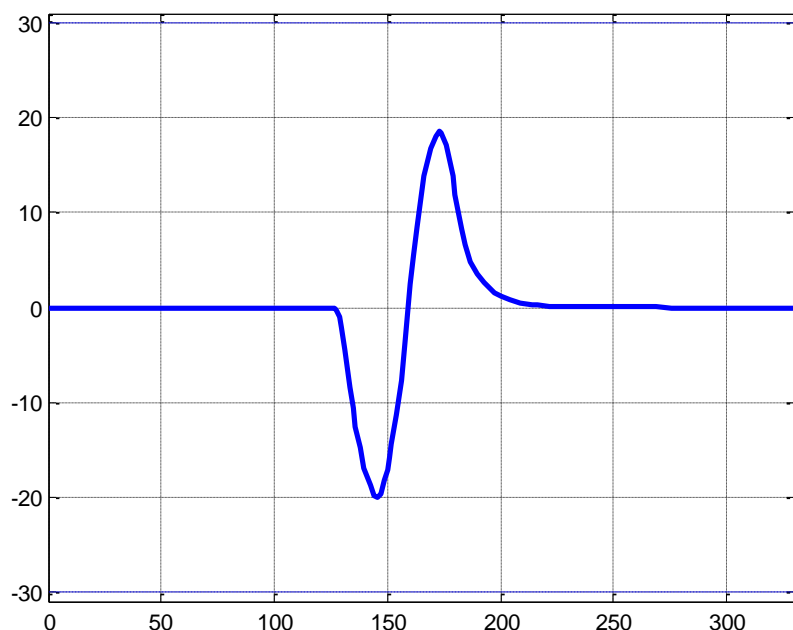


Рис. 8. Отклонение вертикальных рулей

Из представленных графиков видно, что переходный процесс при таком возмущении имеет допустимую длительность (80 секунд), а также внешние возмущения полностью компенсируются.

Таким образом, в статье представлена компьютерная модель системы автоматического управления движением с внешними возмущениями. Также представлен программный код, реализующий формирование автоматической системы управления. Для проверки качества сформированной модели и управления проведено компьютерное моделирование динамики конкретного объекта управления.

Библиографический список

1. Veremei E.I., Korchanov V.M. Multiobjective stabilization of a certain class of dynamic systems // Automation and Remote Control, №49, 1989. pp. 1210 – 1219.
2. Веремей Е.И. Линейные системы с обратной связью. – СПб.: Изд-во «Лань», 2013 – 448 с.

3. Веремей Е. И., Корчанов В. М. Многоцелевая стабилизация динамических систем одного класса // АН СССР. Автоматика и телемеханика. 1988. – № 9. – С. 126–137.

4. Веремей Е.И. Синтез законов многоцелевого управления движением морских объектов // Гироскопия и навигация. 2009. – № 4. –С. 3–14.

5. Smirnov N.V., Smirnova M.A., Smirnov A.N., Smirnov M.N. Combined control synthesis algorithm. 2017 Constructive Nonsmooth Analysis and Related Topics (Dedicated to the Memory of V.F. Demyanov), CNSA 2017 - Proceedings. –2017 – pp. 194-196.

6. Smirnova M.A., Smirnov M.N., Smirnova T.E., Smirnov N.V. Multipurpose control laws in motion control systems // Information (Japan). –2017. – 20(4). –pp. 2265-2272.2017.

7. Smirnov N.V., Smirnova M.A., Smirnova T.E., Smirnov M.N. The Problem of Synthesis the Control Laws with Uncertainties in External Disturbances. // Lecture Notes in Engineering and Computer Science, –2017.– pp. 276-279.

8. Smirnov N.V., Smirnova M.A., Smirnova T.E., Smirnov M.N. The Issues of Multipurpose Control Laws Construction. // Lecture Notes in Engineering and Computer Science. –2017. –pp. 194-196.

9. Smirnova M.A., Smirnov M.N. Multipurpose control laws in trajectory tracking problem.// International Journal of Applied Engineering Research. –2017– 11(22), – pp.11104-11109.

10. Vitrant E., Canudas–De–Vit C., Georges D., Alamir M. Remote stabilization via time–varying communication network delays // IEEE Conference in Control Applications, Taiwan, –2004.

11. Smirnov M.N., Smirnova M.A. Control synthesis for marine vessels in case of limited disturbances // Telkomnika (Telecommunication Computing Electronics and Control), – 2018, –16(2), –pp. 648–653.

12. Smirnov M.N., Smirnova M.A. Questions of stabilization and control of unmanned aerial vehicles // *Comptes Rendus de L'Academie Bulgare des Sciences*, –2018, –71(1), –pp. 87–91.

Literature

1. Veremei E.I., Korchanov V.M. Multiobjective stabilization of a certain class of dynamic systems // *Automation and Remote Control*, №49, 1989. pp. 1210 – 1219.

2. Veremei E.I. *Linejnye sistemy s obratnoj svyaz'yu*. – SPb.: Izd-vo «Lan'», 2013 – 448 s.

3. Veremei E. I., Korchanov V. M. Mnogocelelevaya stabilizaciya dinamicheskikh sistem odnogo klassa // *AN SSSR. Avtomatika i telemekhanika*. 1988. – № 9. – S. 126–137.

4. Veremei E. I. Sintez zakonov mnogocelelevogo upravleniya dvizheniem morskikh ob"ektov // *Giroskopiya i navigaciya*. 2009. – № 4. –S. 3–14.

5. Smirnov N.V., Smirnova M.A., Smirnov A.N., Smirnov M.N. Combined control synthesis algorithm. 2017 Constructive Nonsmooth Analysis and Related Topics (Dedicated to the Memory of V.F. Demyanov), CNSA 2017 - Proceedings. –2017 – pp. 194-196.

6. Smirnova M.A., Smirnov M.N., Smirnova T.E., Smirnov N.V. Multipurpose control laws in motion control systems // *Information (Japan)*. –2017. – 20(4). –pp. 2265-2272.2017.

7. Smirnov N.V., Smirnova M.A., Smirnova T.E., Smirnov M.N. The Problem of Synthesis the Control Laws with Uncertainties in External Disturbances. // *Lecture Notes in Engineering and Computer Science*, –2017.– pp. 276-279.

8. Smirnov N.V., Smirnova M.A., Smirnova T.E., Smirnov M.N. The Issues of Multipurpose Control Laws Construction. // *Lecture Notes in Engineering and Computer Science*. –2017. –pp. 194-196.

9. Smirnova M.A., Smirnov M.N. Multipurpose control laws in trajectory tracking problem.// International Journal of Applied Engineering Research. –2017–11(22), – pp.11104-11109.

10. Vitrant E., Canudas–De–Vit C., Georges D., Alamir M. Remote stabilization via time–varying communication network delays // IEEE Conference in Control Applications, Taiwan, –2004.

11. Smirnov M.N., Smirnova M.A. Control synthesis for marine vessels in case of limited disturbances // Telkomnika (Telecommunication Computing Electronics and Control), – 2018, –16(2), –pp. 648–653.

12. Smirnov M.N., Smirnova M.A. Questions of stabilization and control of unmanned aerial vehicles // Comptes Rendus de L'Academie Bulgare des Sciences, –2018, –71(1), –pp. 87–91.