

Verba Gennady Efimovich – Augur Aeronautical Centre; e-mail: info@rosaerosystems.com; 68, Leningradsky avenue, bld. 16, Moscow, 125315, Russia; phone: +74959897425; International Airship Association member; Chairman of the Board.

Shchugarev Sergey Nikolaevich – cand. of eng. sc.; academician Russian Academy of cosmonautics.

Ivchenko Boris Aleksandrovich – cand. of eng. sc.; deputy General director – chief designer – head of the Design Bureau.

Ponomarev Pavel Ardalionovich – cand. of eng. sc.; deputy General director – government relations director.

Talesnikov Mikhail Valentinovich – International Airship Association member; deputy General director – commercial director.

УДК 629.73.015:533.6:519.711.3

В.Х. Пшихопов, Н.Е. Сергеев, М.Ю. Медведев, А.Е. Кульченко

АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ В ЗАДАЧЕ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ МИНИ-ВЕРТОЛЕТА CALIBER V90

Приводится постановка задачи идентификации параметров мини-вертолета в рамках проекта создания роботизированного вертолетного комплекса. Рассматриваются план проведения экспериментального исследования и алгоритмы постобработки данных. Предлагаются алгоритмы оценивания центра масс и сил, и моментов, действующих на вертолет. Также предлагаются методы фильтрации и сглаживания экспериментальных данных. Приводится процедура определения указанных параметров вертолета по результатам экспериментального взлета и посадки вертолета. Проведенный анализ показал необходимость увеличения частоты измерений и фильтрации вибрационных шумов для повышения точности определения параметров.

Робот; вертолет; идентификация; алгоритмы обработки; экспериментальное исследование.

V.Kh. Pshihopov, N.E. Sergeev, M.Y. Medvedev, A.E. Kulchenko

APPROACH FOR DATA PROCESSING IN THE PROBLEM IDENTIFICATION OF PARAMETERS OF MINI-HELICOPTER CALIBER V90

In this paper, we present a problem identification of helicopter parameters for robotics project. Paper presents scenarios of experiments and post-processing approach for data. We describe the approaches for estimation of center of inertia, moments and forces which effect on a helicopter. There are described approaches of filtering and smoothing for experimental data and procedure of helicopter parametric identification, which based on take-off – landing mode, as well. Analysis showed what increasing of measurement rate and noise/vibration filtering are needed to improve parametric identification.

Robot; helicopter; identification; data processing algorithm; experiment.

Введение. Проведение экспериментального исследования является обязательным этапом в создании системы управления роботизированного вертолета. В работах [1–4] были рассмотрены задачи, связанные с теорией вертолета, численным моделированием, некоторыми алгоритмами. Однако для использования системы управления с позиционно-траекторным управлением необходимо иметь корректную математическую модель [7, 9, 11, 12]. В этой связи целью эксперимента является идентификация параметров мини-вертолета. Задачи эксперимента состоят в следующем:

- ◆ определить неизвестные параметры, входящие в уравнения динамики вертолета;
- ◆ разработать метод обработки данных эксперимента;
- ◆ провести сравнение теоретических расчетов и результатов обработки экспериментальных данных;
- ◆ проверить аппаратное обеспечение в реальных условиях полета, выявить программные недоработки.

В статье рассматривается задача построения алгоритма обработки данных эксперимента. Данные эксперимента представляют собой информационные массивы следующих датчиков:

- ◆ ультразвуковой дальномер SRF05, который позволяет измерять высоту h , от 0,01 до 5м, с точностью 0,01 м;
- ◆ энкодер ЛИР119А измеряет n -обороты на валу НВ;
- ◆ микропроцессорная плата Arduino Duemilanove измеряет PPM сигналы по 6 каналам на выходе приемника радиуправления, поступающие на вход сервоприводов;
- ◆ ИНС КомпаНав-2 позволяет измерять: углы тангажа, крена и рысканья, линейные и угловые скорости вертолета в связанной СК, кажущиеся линейные ускорения в связанной СК, барометрическую высоту и т.д.

Выдвигаются требования к условиям полета из учета типа двигателя мини-вертолета (ДВС): температура окружающей среды +3 и выше, ровная площадка, ясная погода без осадков, тумана и пр.

Для получения наиболее полного набора данных по базовым режимам полета выполняются следующие упражнения:

- ◆ взлет-посадка (с разным ускорением);
- ◆ взлет-висение-посадка (с разным ускорением);
- ◆ взлет-висение-вращение по углу рысканья-посадка (с разным ускорением);
- ◆ взлет-полет по прямой – посадка (с разным ускорением);
- ◆ взлет-полет по П-образной траектории (хвост удерживается) – посадка (с разным ускорением);
- ◆ взлет-полет по П-образной траектории (хвост поворачивается) – посадка (с разным ускорением);
- ◆ свободный полет (с разным ускорением).

Полностью подготовленный к полету мини-вертолет с бортовой системой измерений приведен на рис. 1.



Рис. 1. Мини-вертолет с бортовой системой измерений в сборе

Обработка данных эксперимента. Рассмотрим алгоритмы обработки экспериментальных данных на примере режима взлет-посадка. Перед тем как приступить к непосредственной обработке данных из общего массива измерений, необходимо выделить интересующий участок. Этот участок может соответствовать нескольким режимам полета либо одному конкретному, например режиму взлета. Эксперимент проводился в условиях низкой температуры, поэтому требовалось дополнительное время на прогрев двигателя вертолета. Предварительная обработка позволяет убрать данные, поступившие во время прогрева. Полет вертолета сопровождался видеосъемкой. Разбиение видеоряда на фазы позволяет ускорить интерпретацию данных измерений (рис. 2).



Рис. 2. Взлет мини-вертолета с полезной нагрузкой на борту

В результате эксперимента получен массив измерений, содержащий время, обороты рулевого винта, углы крена, тангажа и курса, линейные и угловые скорости, линейные ускорения, воздушную скорость, барометрическую высоту, ШИМ-сигналы, которые поступают на входы исполнительных механизмов вертолета. РВ приводится в действие посредством ременной тяги. Для перехода к оборотам несущего винта (НВ) или оборотам двигателя, необходимо перемножить обороты РВ на соответствующие передаточные числа: 9,8:1:4,8. Таким образом, формулы для перехода имеют следующий вид:

$$n_{ДВ} = \frac{n_{РВ}}{9,8};$$

$$n_{ДВ} = \frac{n_{РВ}}{9,8} \cdot 4,8. \quad (1)$$

Результаты эксперимента показали, что обороты РВ практически не содержат шумов, поэтому дополнительной обработки не требуется. Для остальных данных: углов ориентации вертолета, линейных и угловых скоростей, линейных ускорений, показаний высоты и воздушной скорости применяется фильтрация. Дополнительно применяется метод сглаживающих сплайнов (smooth spline) из инструментария Matlab Curve Fitting Tool (рис. 3).

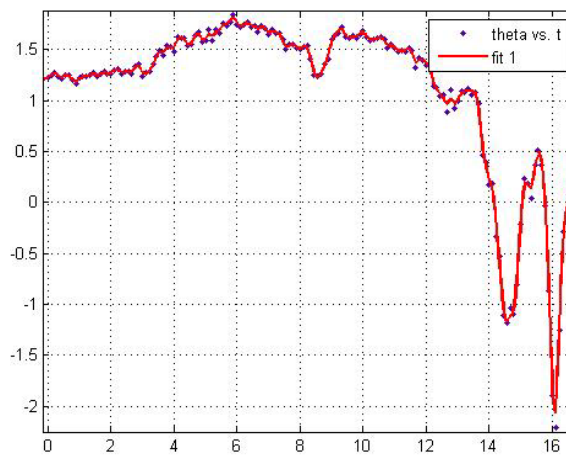


Рис. 3. Угол тангажа вертолета

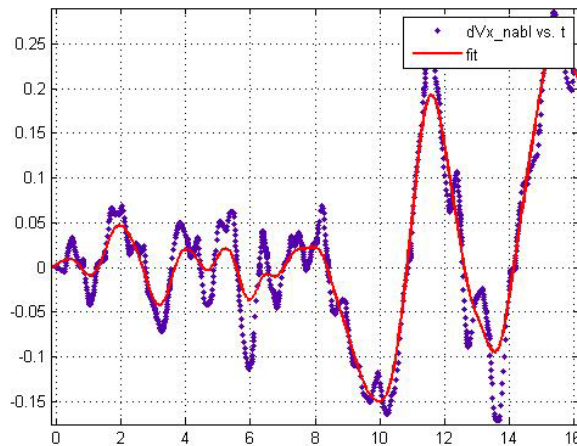


Рис. 4. Линейное ускорение A_x ($k_1=6$, $k_2=9$).

Для получения линейных и угловых ускорений, соответствующие скорости $V_x, V_y, V_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z$ дифференцируются. При этом применяется оценивание с помощью рекуррентного наблюдателя производных (РНП) [5, 6, 8, 10]. Например, для нахождения линейного ускорения A_x (рис. 4) решаются уравнения следующего вида:

$$\begin{aligned}
\dot{z}_1 &= z_2 + k_1(V_x - z_1); \\
\dot{z}_2 &= k_1(V_x - z_1); \\
\dot{V}_x &\approx z_2; \\
k_2 &= \frac{k_1^2}{4},
\end{aligned} \tag{2}$$

где k_1 – задаваемый параметр, начальные значения $z_1 = 0$, $z_2 = 0$.

Аналогично (2) вычисляются оценки остальных ускорений. На основании результатов измерений и оценок ускорений вычисляются оценки сил и моментов, действующих на вертолет и координаты Ц.М. Указанные оценки базируются на уравнениях динамики вертолета:

$$\begin{cases} m(\dot{V}_x + \omega_y V_z - \omega_z V_y + \dot{\omega}_y z_T - \dot{\omega}_z y_T + \omega_x \omega_y y_T + \omega_x \omega_z z_T - x_T \omega_y^2 - x_T \omega_z^2) = F_x; \\ m(\dot{V}_y + \omega_z V_x - \omega_x V_z + \dot{\omega}_z x_T - \dot{\omega}_x z_T + \omega_y \omega_x x_T + \omega_y \omega_z z_T - y_T \omega_x^2 - y_T \omega_z^2) = F_y; \\ m(\dot{V}_z + \omega_x V_y - \omega_y V_x + \dot{\omega}_x y_T - \dot{\omega}_y x_T + \omega_z \omega_x x_T + \omega_z \omega_y y_T - z_T \omega_x^2 - z_T \omega_y^2) = F_z; \end{cases} \tag{3}$$

$$\begin{cases} J_x \dot{\omega}_x - J_{xy}(\dot{\omega}_y - \omega_x \omega_z) + (J_z - J_y)\omega_y \omega_z - J_{xz} \dot{\omega}_z - \omega_y(J_{zx} \omega_x + J_{zy} \omega_y) + \\ + J_{yz} \omega_z^2 + m(y_T \dot{V}_z - z_T \dot{V}_y - y_T V_x \omega_y + y_T V_y \omega_x - z_T V_x \omega_z + z_T V_z \omega_x) = M_x; \\ J_y \dot{\omega}_y - J_{xy}(\dot{\omega}_x + \omega_y \omega_z) + (J_x - J_z)\omega_x \omega_z - J_{yz} \dot{\omega}_z - J_{xz} \omega_z^2 + \\ + \omega_x(J_{zx} \omega_x + J_{zy} \omega_y) + m(z_T \dot{V}_x - x_T \dot{V}_z + x_T V_x \omega_y - y_T V_y \omega_x - z_T V_x \omega_z + z_T V_z \omega_y) = M_y; \\ J_z \dot{\omega}_z - J_{xy}(\omega_x^2 - \omega_y^2) + (J_y - J_x)\omega_x \omega_y - J_{zx} \dot{\omega}_x - J_{zy} \dot{\omega}_y - \omega_z(J_{yz} \omega_x - J_{xz} \omega_y) + \\ + m(x_T \dot{V}_y - y_T \dot{V}_x + x_T V_x \omega_z - x_T V_z \omega_x + y_T V_y \omega_z - y_T V_z \omega_y) = M_z. \end{cases} \tag{4}$$

где F_x, F_y, F_z – проекции полной силы, в которую входят: внешние силы действующие на вертолет и неизмеряемые внешние возмущения, действующие на вертолет (ветер, влияние метеорологических элементов и явлений); M_x, M_y, M_z – моменты сил вертолета; J_x, J_y, J_z , – моменты инерции.

В полете m (масса вертолета) меняется во времени, меняются координаты Ц.М. Также координаты Ц.М. меняются вследствие раскачивания топлива в баке. Для получения $x_T, y_T, z_T, F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z$ решаются две системы линейных уравнений, имеющих следующий вид:

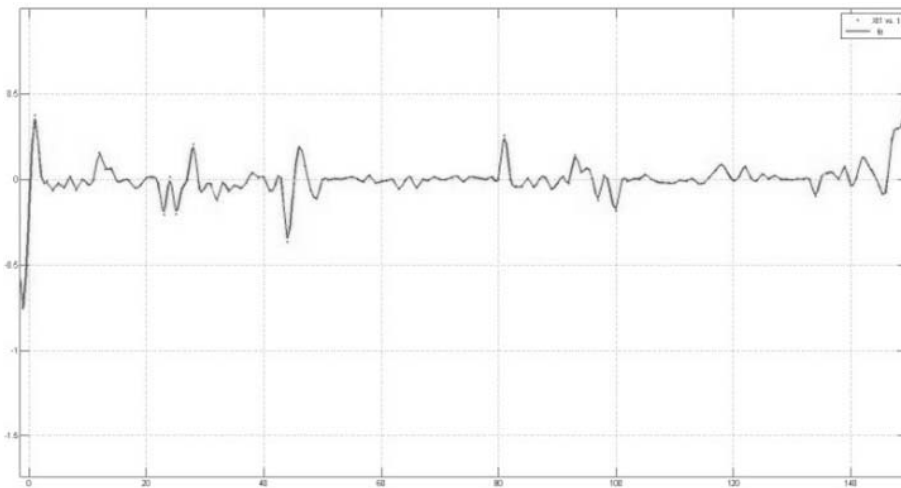
$$X = A^{-1} \times B, \tag{5}$$

$$A = \begin{bmatrix} -m(\omega_{y_i}^2 + \omega_{z_i}^2) & m(\omega_{x_i} \omega_{y_i} - \dot{\omega}_{z_i}) & m(\dot{\omega}_{y_i} + \omega_{x_i} \omega_{z_i}) & -1 & 0 & 0 \\ m(\dot{\omega}_{z_i} + \omega_{y_i} \omega_{x_i}) & -m(\omega_{x_i}^2 + \omega_{z_i}^2) & m(\omega_{y_i} \omega_{z_i} - \omega_{x_i}) & 0 & -1 & 0 \\ m(\omega_{z_i} \omega_{x_i} - \dot{\omega}_{y_i}) & m(\omega_{x_i} + \omega_{z_i} \omega_{y_i}) & -m(\omega_{x_i}^2 + \omega_{y_i}^2) & 0 & 0 & -1 \\ -m(\omega_{y_{(i+1)}}^2 + \omega_{z_{(i+1)}}^2) & m(\omega_{x_{(i+1)}} \omega_{y_{(i+1)}} - \dot{\omega}_{z_{(i+1)}}) & m(\dot{\omega}_{y_{(i+1)}} + \omega_{x_{(i+1)}} \omega_{z_{(i+1)}}) & -1 & 0 & 0 \\ m(\dot{\omega}_{z_{(i+1)}} + \omega_{y_{(i+1)}} \omega_{x_{(i+1)}}) & -m(\omega_{x_{(i+1)}}^2 + \omega_{z_{(i+1)}}^2) & m(\omega_{y_{(i+1)}} \omega_{z_{(i+1)}} - \omega_{x_{(i+1)}}) & 0 & -1 & 0 \\ m(\omega_{z_{(i+1)}} \omega_{x_{(i+1)}} - \dot{\omega}_{y_{(i+1)}}) & m(\omega_{x_{(i+1)}} + \omega_{z_{(i+1)}} \omega_{y_{(i+1)}}) & -m(\omega_{x_{(i+1)}}^2 + \omega_{y_{(i+1)}}^2) & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

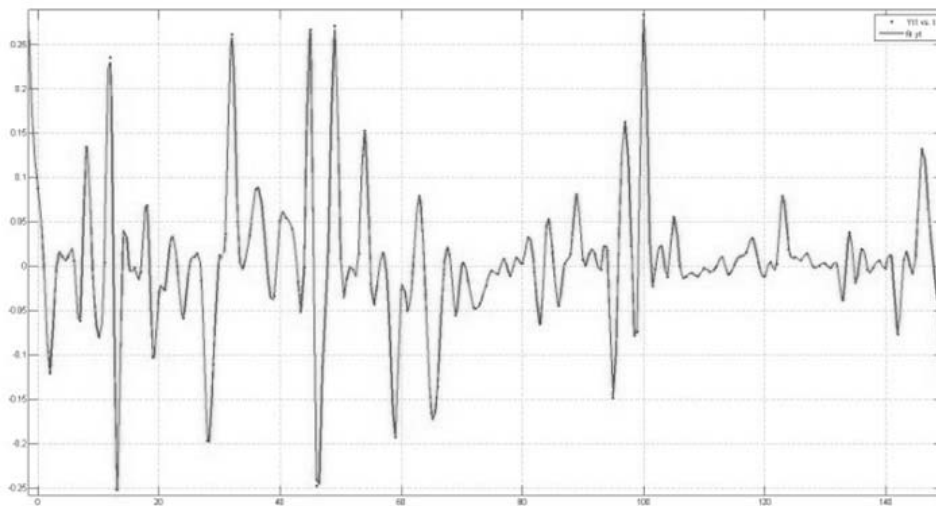
$$B = \begin{bmatrix} -m(\dot{V}_{x_i} + \omega_{y_i} V_{z_i} - \omega_{z_i} V_{x_i}) \\ -m(\dot{V}_{y_i} + \omega_{z_i} V_{x_i} - \omega_{x_i} V_{z_i}) \\ -m(\dot{V}_{z_i} + \omega_{x_i} V_{y_i} - \omega_{y_i} V_{x_i}) \\ -m(\dot{V}_{x_{(i+1)}} + \omega_{y_{(i+1)}} V_{z_{(i+1)}} - \omega_{z_{(i+1)}} V_{x_{(i+1)}}) \\ -m(\dot{V}_{y_{(i+1)}} + \omega_{z_{(i+1)}} V_{x_{(i+1)}} - \omega_{x_{(i+1)}} V_{z_{(i+1)}}) \\ -m(\dot{V}_{z_{(i+1)}} + \omega_{x_{(i+1)}} V_{y_{(i+1)}} - \omega_{y_{(i+1)}} V_{x_{(i+1)}}) \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} x_T \\ y_T \\ z_T \\ F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix}$$

где X – вектор неизвестных.

Для x_T , y_T , z_T производится оценка дисперсии и расчет среднего арифметического. Ниже приведены графики для y_T , z_T . Так, для данного режима дисперсия принимает следующие значения: $D_{xT} = 0,0327$; $D_{yT} = 0,0060$; $D_{zT} = 0,0070$, среднее арифметическое $Cp.x_T = 0,0053$; $Cp.y_T = 0,0033$; $Cp.z_T = 8,8756e-004$.



а



б

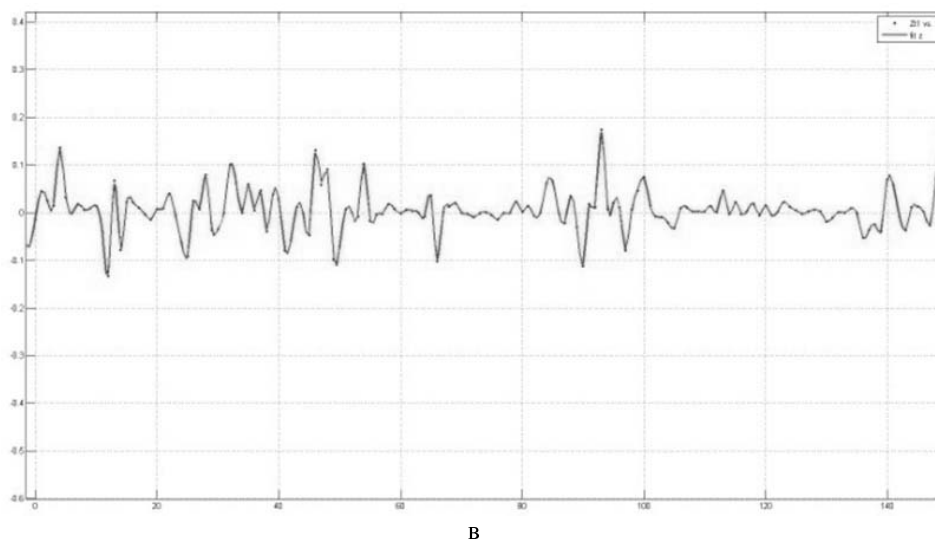


Рис. 5. Координаты Ц.М. по оси $OX(a)$, $OY(b)$, $OZ(в)$

Из графиков (рис. 5) и результатов анализа видно, что математическое ожидание x_t , y_t , z_t близко к нулю, что соответствует действительности. Однако дисперсии оценок велики. Для повышения качества оценивания планируется повышение частоты измерений и дополнительная фильтрация.

Выводы. Создан задел для экспериментального исследования параметров вертолета. Предлагаемый алгоритм обработки данных может использоваться на борту роботизированного вертолета для идентификации модели и синтеза системы управления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Костюков В.А., Кульченко А.Е. Моделирование полета одновинтового мини-вертолета по целевой траектории. VI Международная научно-практическая Интернет-конференция «Спецпроект: анализ научных исследований» 2011. – (тезисы).
2. Кульченко А.Е. «Алгоритмы функционирования автопилота робота-вертолета» // Инженерный Вестник Дона, 2011.
3. Кульченко А.Е. Программно-аппаратный моделирующий комплекс для робота – вертолета // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН.
4. Кульченко А.Е., Федоренко Р.В. Структурно-алгоритмическая организация системы управления БПЛА на базе мини-вертолета // Перспективные системы и задачи управления: Материалы Пятой Всероссийской научно-практической конференции. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2010. – С. 135-139.
5. Медведев М.Ю. Алгоритмы адаптивного управления исполнительными приводами // Мехатроника, автоматизация и управление. – 2006. – № 6. – С. 17-22.
6. 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.
7. Пшихопов В.Х. Управление подвижными объектами в априори неформализованных средах // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2008. – № 12 (89). – С. 6-20.
8. Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю. Оценивание и управление в сложных динамических системах. – М.: Физматлит, 2009. – 295 с.
9. Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю. Синтез адаптивных систем управления летательными аппаратами // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № 3 (104). – С. 187-196.

10. *Психопов В.Х., Медведев М.Ю.* Структурный синтез автопилотов подвижных объектов с оценением возмущений // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2006. – № 1. – С. 103-109.
11. *Психопов 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.
12. *Психопов В.Х.* Позиционно-траекторное управление подвижными объектами. – Таганрог: ТТИ ЮФУ, 2009. – 183 с.

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

Психопов Вячеслав Хасанович – Технологический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге; 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: medv_mihal@rambler.ru; кафедра электротехники и мехатроники; к.т.н., доцент.

Кульченко Артем Евгеньевич – e-mail: liandal@rambler.ru; кафедра электротехники и мехатроники; аспирант; ассистент.

Сергеев Николай Евгеньевич – e-mail: oknok2005@yandex.ru; тел.: 88634312241; учебный военный центр ЮФУ; зам. нач. УВЦ ЮФУ; д.т.н.

Pshixopov Vyacheslav Xasanovich – Taganrog Institute of Technology – 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; department head; dr. of eng. sc.

Medvedev Mixail Yur’evich – e-mail: medv_mihal@rambler.ru; the department of electrical engineering and mechatronics; cand. of eng. sc.; associate professor.

Kulchenko Artem Evgenievich – e-mail: liandal@rambler.ru; the department of electrical engineering and mechatronics; postgraduate student; lecturer.

Sergeev Nicolay Evgenievich – e-mail: psichop @rambler.ru; phone: +78634312241; the military educational center; assistant chief; dr. of eng. sc.; assistant chief.

УДК 623.827:001.89 (075.8) (021.5)

Г.Ю. Илларионов

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ВОЕННОГО ПРИМЕНЕНИЯ ПОДВОДНЫХ РОБОТОВ ЗА РУБЕЖОМ

Рассмотрены вопросы военного применения подводных робототехнических систем и комплексов в ряде зарубежных стран. Формулируются главные цели методы ведения боевых действий на море, анализируются стратегические концепции ВМС США и НАТО. На основе проведенного анализа формулируются задачи, решаемые с помощью необитаемых подводных аппаратов, и формулируются перспективные направления развития подводной техники. Проведенный анализ может использоваться при разработке концепции противодействия ВМС США и НАТО при ведении боевых действий в мировом океане и в прибрежной акватории.

Военно-морские силы; автономные необитаемые подводные аппараты; боевые подводные роботы; сетцентрический способ боевых действий.