

С. В. Алилуев¹, ведущий конструктор, s.v.aliluev@kbpa.ru,

А. А. Большаков², д-р техн. наук, проф., aabolshakov57@gmail.com,

А. Н. Попов¹, ген. директор, pilot@kbpa.ru,

Д. П. Тетерин¹, д-р техн. наук, зам. ген. директора по науке, tdp@kbpa.ru,

¹ АО "Конструкторское бюро промышленной автоматики", г. Саратов,

² Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)

Методики и алгоритмы контроля и диагностики привода системы управления автономного подвижного аппарата

Обоснованы экстремальные требования к средствам контроля технического состояния и диагностики отказов электропневматического рулевого привода с гидравлическим тормозом автономного подводного аппарата. С использованием методов системного анализа осуществлена декомпозиция требований до уровня функций средств контроля и диагностики рулевого привода. Разработаны методики и алгоритмы контроля и диагностики привода, комплект технологической контрольно-проверочной аппаратуры.

Ключевые слова: электропневматический рулевой привод, рулевой привод, автономный подводный аппарат, элементы системы управления

Введение

Развитие человечества в текущем тысячелетии во многом связано с освоением пространства и ресурсов Мирового океана. Для эффективного обеспечения национальных интересов Российской Федерации [1] необходимо создание эффективных средств исследования морских и океанических акваторий, к которым относятся в том числе автономные подводные аппараты (АПА). Эксплуатационные характеристики и эффективность таких аппаратов непосредственно зависят от технического состояния приводов органов управления АПА, которое необходимо контролировать на всех стадиях жизненного цикла приводов и подводного аппарата [2]. Для традиционных конструктивных исполнений электромеханических, электропневматических и электрогидравлических рулевых приводов (РП) разработаны и успешно используются методики и алгоритмы контроля и диагностики технического состояния. Появление высокоскоростных АПА привело к созданию гибридного (комбинированного) РП — электропневматического привода с гидравлическим тормозом [3, 4]. Это

обуславливает необходимость разработки соответствующих методик, алгоритмов и программно-аппаратных решений для контроля и диагностики подобных РП при создании и эксплуатации АПА.

Постановка задачи

Рассматривается автономный необитаемый подводный аппарат, который перемещается в воде на глубине до 30 м со скоростями более 100 км/ч. Управление АПА осуществляется двумя парами рулей, которые в зависимости от режима движения аппарата занимают относительно корпуса положение от 0 до 90°. Изменение положения каждого руля осуществляет электропневматический привод с гидравлическим тормозом (рис. 1). Требуется разработать методики и программно-аппаратные средства контроля текущего технического состояния и диагностики отказов РП в условиях проектирования, серийного производства и эксплуатации.

Задачу предлагается решать в соответствии со следующими этапами:

1. Обосновать требования и сформировать техническое задание на разработку технологического оборудования, реализующего методики и алгоритмы контроля и диагностики РП при создании контрольно-проверочной аппаратуры (КПА).

2. Выполнить декомпозицию экстремальных требований к КПА до уровня функций контроля и диагностики РП в условиях серийного производства и эксплуатации АПА. На основе сформулированных экстремальных функций контроля и диагностики РП определить перечень методик контроля и диагностики, которые необходимо разработать.

3. Разработать методики, алгоритмы контроля и диагностики РП.

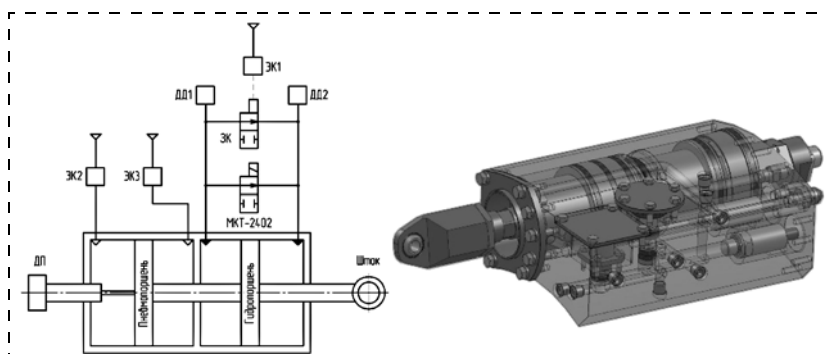


Рис. 1. Электропневматический привод с гидравлическим тормозом:

ДД1, ДД2 — датчики давления, ДП — датчик положения, ЗК, ЭК1, ЭК2, ЭК3, МКТ-2402 — электромагнитные клапаны

- 4. Разработать и изготовить КПА.
- 5. Выполнить отработку (апробирование) разработанных методик и алгоритмов средствами КПА.

Обоснование требований к КПА

Для обоснования требований к КПА (рис. 2) использован метод системного анализа средств моделирования сложных технических систем — номенклатурного нормирования [5].

В соответствии с данным методом формирование требований к КПА осуществляется в несколько этапов:

1. По логической формуле определяются общая цель создания аппаратуры $\Pi_0 = (\Pi_{\text{и}} \cup \Pi_{\text{н}} \cup X \cup \text{Б}) \cap \cap \text{В} = \text{"Контроль технического состояния и диагностика отказов АПА"}$, а также подцели, определяющие функции КПА, $\Pi_1 = \text{"Контроль технического состояния электропневматического привода с гидравлическим тормозом"}$ и $\Pi_2 = \text{"Диагностика отказов электропневматического привода с гидравлическим тормозом"}$ (обозначения соответствуют рис. 2).

2. Формируются подмножества условий эксплуатации АПА-РП (Y_3), экстремальных условий ($Y_{\text{п}}$) и специфических условий ($Y_{\text{с}}$), а также множество ситуаций применения АПА-РП по соотношению $S = \{C_1, C_2, \dots\} \subset (Y_3 \times Y_{\text{п}} \times Y_{\text{с}})$. Здесь ситуациями описываются возможные варианты, в которых планируется использовать РП [6].

Формирование множества ситуаций осуществляется табличным методом синтеза ситуаций (упрощенный фрагмент показан в табл. 1).

Элементарные составляющие требований анализируются на совместимость и другие отношения

Элементарные составляющие требований

Таблица 1

Обозначение		Формулировка требования
Y_3	Y_1	Максимальная глубина погружения h м
	Y_2	Пониженная температура среды $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$
	Y_3	Относительная влажность среды 100 %
$Y_{\text{п}}$	Y_4	Крейсерская скорость движения до V км/ч
$Y_{\text{с}}$	Y_5	Движение в двухфазной среде (жидкость—газ)

Матрица отношений на произведении ($Y_3 \times Y_{\text{п}} \times Y_{\text{с}}$)

Таблица 2

Обозначение	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5
Y_1	0	0	1	0	0
Y_2	0	0	0	0	0
Y_3	1	0	0	1	0
Y_4	0	0	1	0	1
Y_5	0	0	0	1	0

между ними. Результаты анализа записываются в клетках, находящихся на пересечении строк и столбцов. Несовместимые пары элементарных составляющих требований помечаются цифрой "0", совместимые — цифрой "1" или логическим символом связи между ними (табл. 2).

Для приведенного примера имеем $S = \{Y_1 \times Y_3, Y_3 \times Y_4, Y_4 \times Y_5\}$.

При числе условий достижения целей проектирования более пяти целесообразно выполнять многократный анализ множества ситуаций на прямом произведении ($S \times S$) и для сокращения по-

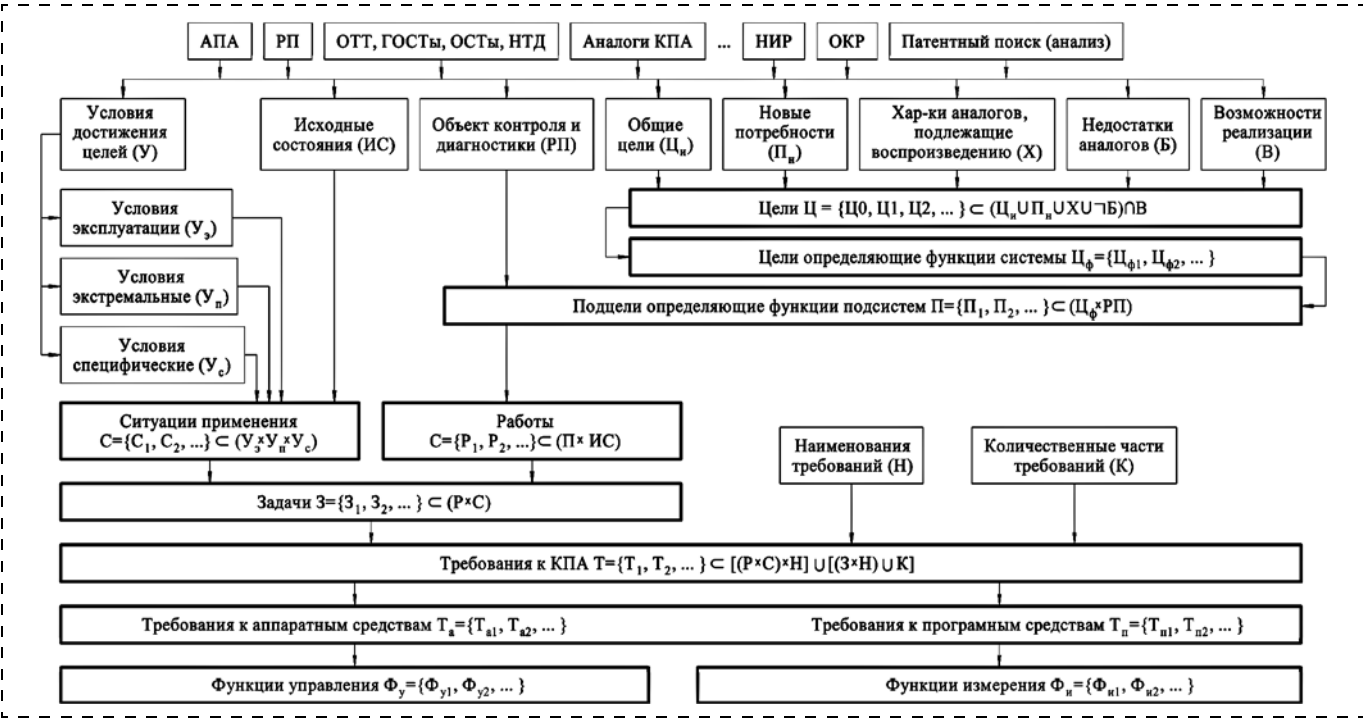


Рис. 2. Порядок обоснования требований к КПА

рядка решаемой задачи выбирать только наиболее неблагоприятные ситуации применения.

Например, для рассматриваемого примера $C_1 = (Y_4 \times Y_5) = \text{"Крейсерская скорость движения до } V \text{ км/ч в двухфазной среде (жидкость—газ)"}.$

Полученные ситуации воспроизводятся (имитируются) КПА в условиях проектирования, серийного производства и эксплуатации РП и АПА.

3. Табличным способом определяются множества задач, выполняемых технологическим оборудованием $Z = \{Z_1, Z_2, Z_3, Z_4\} \subset (P \times C)$, где $P \subset (\Pi \times ИС)$:

$Z_1 = \text{"Контроль технического состояния электропневматического привода с гидравлическим тормозом при полном угле раскрытия и имитации движения АПА на крейсерской скорости до } V \text{ км/ч в двухфазной среде (жидкость—газ)"};$

$Z_2 = \text{"Контроль технического состояния электропневматического привода с гидравлическим тормозом при фиксации рулей относительно корпуса АПА в промежуточном положении и имитации движения АПА на крейсерской скорости до } V \text{ км/ч в двухфазной среде (жидкость—газ)"};$

$Z_3 = \text{"Диагностика отказов электропневматического привода с гидравлическим тормозом при полном угле раскрытия и имитации движения АПА на крейсерской скорости до } V \text{ км/ч в двухфазной среде (жидкость—газ)"};$

$Z_4 = \text{"Диагностика отказов электропневматического привода с гидравлическим тормозом при фиксации рулей относительно корпуса АПА в промежуточном положении и имитации движения АПА на крейсерской скорости до } V \text{ км/ч в двухфазной среде (жидкость—газ)"}.$

4. Формулируются требования к КПА $T = \{T_1, T_2, \dots\}$, которые необходимо включить в техническое задание на разработку КПА (рис. 3).

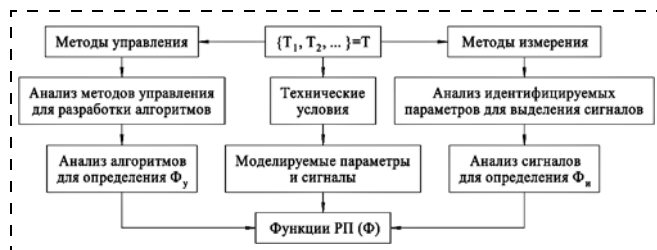


Рис. 3. Порядок перехода от множества Т к множеству Φ



Рис. 4. Иерархия требований к КПА

Например, $T_1 = \text{"Глубина контроля технического состояния электропневматического привода с гидравлическим тормозом при фиксации рулей относительно корпуса АПА в промежуточном положении и имитации движения АПА на крейсерской скорости до } V \text{ км/ч в двухфазной среде (жидкость—газ) — до сменного модуля"}.$ $T_2 = \text{"Диагностика отказов электропневматического привода с гидравлическим тормозом при фиксации рулей относительно корпуса АПА в промежуточном положении и имитации движения АПА на крейсерской скорости до } V \text{ км/ч в двухфазной среде (жидкость—газ) за время не более } t \text{ с"}.$

Декомпозиция требований до уровня функций

Декомпозиция множества требований Т до уровня функций контроля и диагностики привода Φ выполняется согласно рис. 3: $\Phi_y = \{\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \Phi_4, \Phi_5\}$, где $\Phi_1 = \text{"Выдача команды в АПА на перемещение рулей"}.$ $\Phi_2 = \text{"Выдача команды в АПА на фиксацию рулей"}.$ $\Phi_3 = \text{"Формирование усилия на рулях от } 0 \text{ до } (g \pm \Delta) \text{ кг}.$ $\Phi_4 = \text{"Контроль технического состояния сменных модулей РП"}.$ $\Phi_5 = \text{"Диагностика отказов модулей РП"}.$ $\Phi_i = \{\Phi_6, \Phi_7, \Phi_8, \Phi_9\}$, где $\Phi_6 = \text{"Измерение усилия на рулях"}.$ $\Phi_7 = \text{"Измерение угла раскрытия рулей относительно продольной оси АПА"}.$ $\Phi_8 = \text{"Измерение времени перемещения рулей"}.$ $\Phi_9 = \text{"Измерение времени поиска отказавшего модуля РП"}.$

Далее множества Φ_y и Φ_i подвергаются декомпозиции (рис. 4) до уровня функций контроля и диагностики сменных модулей РП с учетом возможностей их реализации разработчиком КПА (Φ_m) в условиях проектирования, производства и эксплуатации $\Phi_m = \{\Phi_k^p, \Phi_d^p, \Phi_k^i, \Phi_d^i, \Phi_k^e, \Phi_d^e\}$,

где, например, $\Phi_k^p = \{\Phi_{k1}^p = \text{"Контроль плавности хода штока РП при максимальном усилии на руле при проведении предварительных испытаний"}.$ $\Phi_{k2}^p, \dots\}$,

$\Phi_d^i = \{\Phi_{d1}^i = \text{"Диагностика отказов запорного клапана ЗК при проведении приемо-сдаточных испытаний"}.$ $\Phi_{d2}^i, \dots\}$, $\Phi_k^e = \{\Phi_{k1}^e = \text{"Контроль показаний датчика положения ДП на различных углах раскрытия рулей при максимальном усилии на руле при проведении регламентных работ (технического обслуживания)"}.$ $\Phi_{k2}^e, \dots\}$.

Методики, алгоритмы контроля и диагностики

На следующем этапе осуществляется переход от функций контроля и диагностики сменных модулей РП к перечню методик контроля и диагностики РП и далее к алгоритмам их реализации [7]:

а) алгоритму контроля плавности хода штока, работоспособности гидравлического замка, скорости перемещения штока, скорости раскрытия рулей при имитации внешней нагрузки, удержания

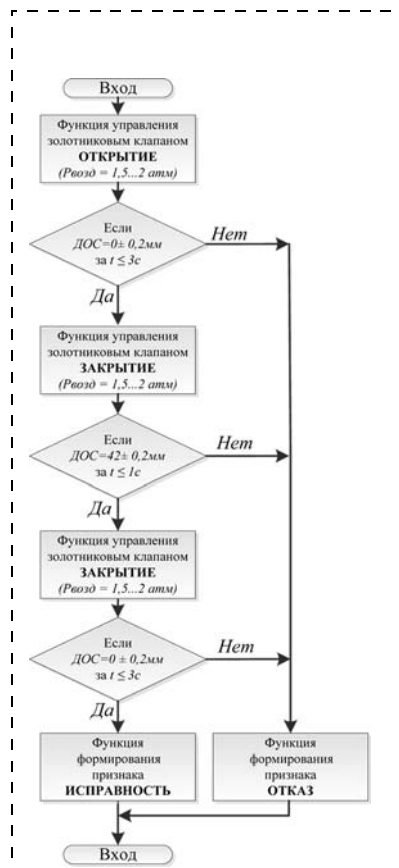


Рис. 5. Блок-схема алгоритма контроля плавности хода штока

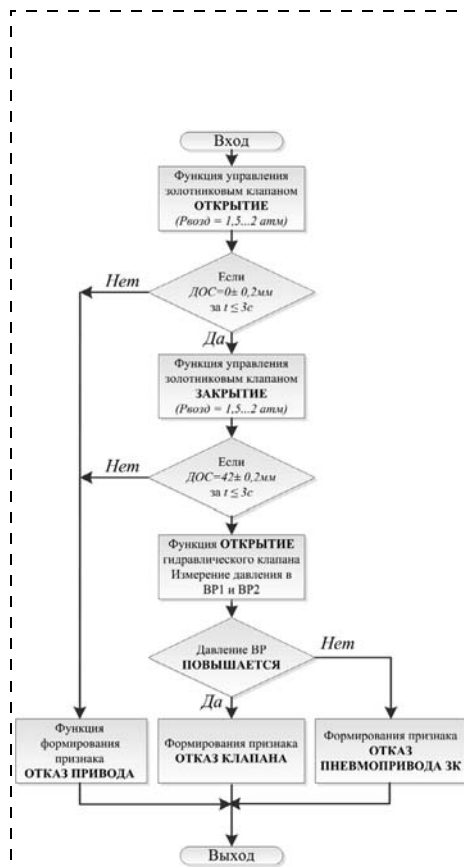


Рис. 6. Блок-схема алгоритма диагностики отказов клапана с пневмоприводом ЗК

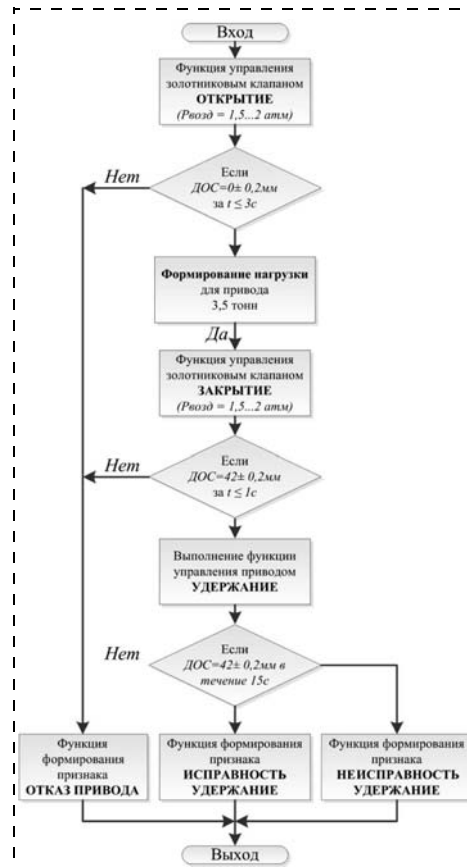


Рис. 7. Блок-схема алгоритма контроля удержания РП

привода в заданных диапазонах нагрузки на различных углах раскрытия рулей, удержания привода при номинальной нагрузке и полном раскрытии рулей и др.;

б) алгоритму диагностики отказов срабатывающих электромагнитных клапанов ЭК2 и ЭК3, клапана с пневмоприводом ЗК, электромагнитного клапана МКТ-2402, датчика положения ДП, датчиков давления ДД1 и ДД2 и др.

Например, методика контроля плавности хода штока РП включает следующие действия согласно блок-схеме алгоритма, представленной на рис. 5: установить руль АПА в исходное (нулевое) положение — руль сложенный; электромагнитные клапаны: ЗК — открыть; ЭК2 — открыть (устанавливается давление, равное 1 атм); ЭК3 — закрыть; на вход электромагнитного клапана ЭК3 подать сжатый воздух под давлением 1,5...2 атм; электромагнитный клапан ЭК3 открыть; измерить время от момента открытия клапана ЭК3 до момента получения информации от датчика перемещения ДП об изменении положения штока РП более чем на 42 мм; если время раскрытия рулей более 0,5 с и менее 1 с, то сформировать сообщение об исправности РП, иначе сформировать сообщение о наличии признаков отказа РП; электромагнитные клапаны: ЭК2 — закрыть; ЭК3 — открыть (устанавливается давление, равное 1 атм); на вход элек-

тромагнитного клапана ЭК2 подать сжатый воздух под давлением 1,5...2 атм; электромагнитный клапан ЭК2 открыть; измерить время от момента открытия клапана ЭК2 до момента получения информации от датчика перемещения ДП об изменении положения штока РП менее чем на 5 мм; если время закрытия рулей более 0,5 с и менее 3 с, то сформировать сообщение об исправности РП, иначе сформировать сообщение о наличии признаков отказа РП.

Блок-схемы алгоритмов диагностики отказов клапана с пневмоприводом ЗК, контроля удержания РП, диагностики датчика положения (ДП) представлены на рис. 6—8 соответственно.

Разработка и изготовление технологического оборудования

На основании технического задания на разработку КПА с учетом общих технических требований (ОТТ), государственных стандартов (ГОСТ), отраслевых стандартов (ОСТ) и прочей нормативной документации (НТД) выполнены:

- синтез множества вариантов реализации конструкции аппаратуры [8];
- многокритериальный выбор эффективных вариантов реализации аппаратуры в зависимости

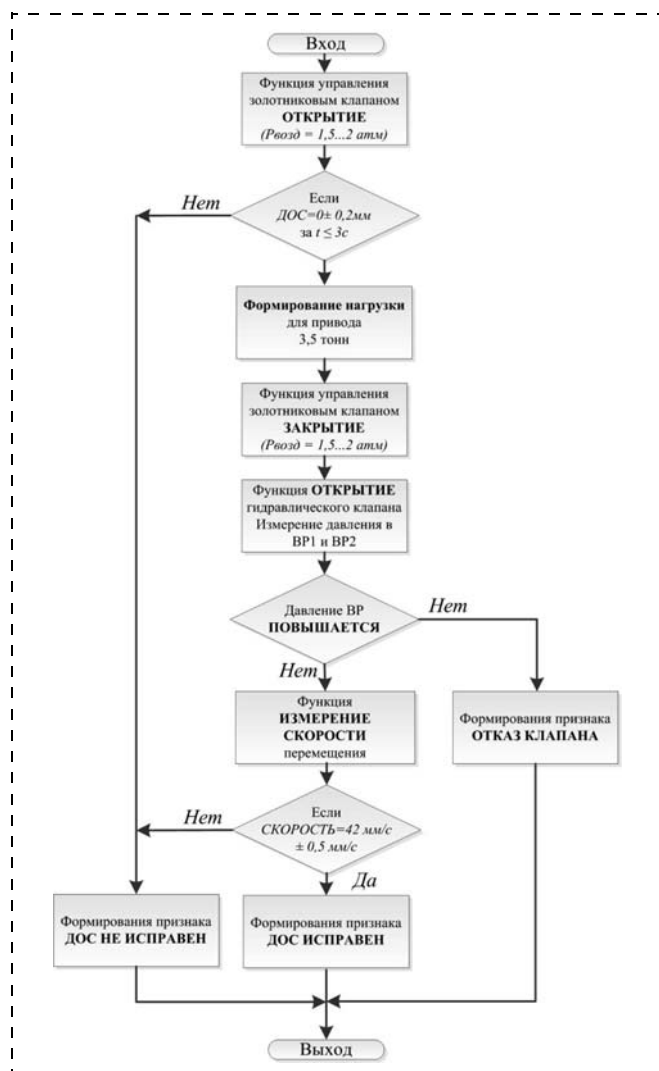


Рис. 8. Блок-схема алгоритма диагностики датчика положения ДП

от условий применения (при проектировании, серийном производстве и в эксплуатации) [8];

- расчет основных технических характеристик;
- определение принципов функционирования КПА;
- проектирование, изготовление, проверка соответствия КПА [9] требованиям технического задания и ввод в эксплуатацию (рис. 9, см вторую сторону обложки).

Заключение

Предложен подход к обоснованию требований к средствам контроля технического состояния и диагностики отказов электропневматического рулевого привода с гидравлическим тормозом автономного подводного аппарата. С использованием методов системного анализа осуществлена декомпозиция экстремальных требований до уровня

функций средств контроля и диагностики РП. Разработаны методики и алгоритмы контроля и диагностики привода, комплект технологической контрольно-проверочной аппаратуры. Новизна предложенного в статье подхода к разработке методик и алгоритмов контроля и диагностики РП АПА [10] заключается в следующем:

- формализация процесса обоснования требований по назначению КПА, переход от требований к функциям аппаратуры и далее к методикам и алгоритмам контроля и диагностики РП, что позволяет снизить вероятность принятия ошибочных решений на стадии создания аппаратуры, которые являются наиболее частыми и приводят к значительному увеличению стоимости и сроков НИОКР;
- разработка технологического оборудования, методик и алгоритмов контроля технического состояния и диагностики отказов нового типа гибридных приводов — электропневматического привода с гидравлическим тормозом.

Список литературы

1. О стратегии национальной безопасности Российской Федерации до 2020 года. Указ Президента РФ от 12.05.2009 года № 537.
2. Новоселов Б. В., Николаев В. Я. Концепция разработки, построения и эффективного использования сервисных средств следящих приводов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2013. № 11. С. 47—52.
3. Алилуев А. В., Алилуев С. В., Гаранин И. В., Говоренко Г. С., Петербург А. И., Поршнев В. А., Тетерин Д. П., Фирсов В. М., Яшин А. Г. Пневмогидравлический привод. Патент на изобретение RU № 114738 F15B11/072. от 23.12.2011.
4. Алилуев С. В., Балашов А. Л., Поршнев В. А., Тетерин Д. П. Процедура выбора рулевого привода органов управления автономного подводного аппарата // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18. № 1 (2). С. 140—144.
5. Тетерин Д. П. Синтез требований к бортовому информационно-измерительному и моделирующему комплексу // Информационно-управляющие системы. 2009. № 1 (38). С. 10—14.
6. Костин А. В., Мяких А. С., Подураев Ю. В., Яковлев С. Ф. Методика определения основных электромеханических параметров прямого линейного электропривода // Мехатроника, автоматизация, управление. 2013. № 10. С. 27—31.
7. Быстров Л. Г., Попов А. А., Тетерин Д. П. Методика оценки работоспособности элементов бортовых систем управления летательных аппаратов в условиях произвольных входных возмущающих воздействий // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. № 12. С. 56—61.
8. Сафронов В. В., Северов А. А., Тетерин Д. П. Выбор наилучшего варианта системы подготовки и пуска летательных аппаратов на основе метода гипервекторного ранжирования // Вестник воздушно-космической обороны. 2015. № 2 (6). С. 99—104.
9. Герман-Галкин С. Г., Загашвили Ю. В. Энергосберегающие стенды для комплексных испытаний электроприводов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 2. С. 39—44.
10. Кушнерик А. А., Михайлов Д. Н., Сергеев Н. С., Шербатюк А. Ф., Гой В. А., Туфанов И. Е., Дубровин Ф. С. Морской робототехнический комплекс, включающий автономные необитаемые подводный и водный аппараты // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 3. С. 67—72.

Methods and Algorithms for Control and Diagnostics of the Steering Gear of the Autonomous Underwater Vehicles

S. V. Aliluev¹, s.v.aliluev@kbpa.ru, A. A. Bolshakov², aabolshakov57@gmail.com✉,

A. N. Popov¹, pilot@kbpa.ru, D. P. Teterin¹, tdp@kbpa.ru,

¹Design Bureau of Industrial Automation Co., Saratov, 41005, Russian Federation

²St. Petersburg State Technological Institute (Technical University), St. Petersburg 190013, Russian Federation

Corresponding author: **Bolshakov Aleksandr A.**, Professor of the Computer Aided Design and Management Department, St. Petersburg State Institute of Technology (Technical University), 190013, St. Petersburg, Russia, Moskovsky pr. 26, e-mail: aabolshakov57@gmail.com

Received on November 11, 2016

Accepted on November 23, 2016

An approach is proposed for substantiation of the requirements for the use of the means of control of a technical state and diagnostics of failures of the electro-pneumatic steering gear with a hydraulic brake for the autonomous underwater vehicles. The extreme requirements are based on the use and means of control of a technical state and diagnostics of failures of the electro-pneumatic steering gear with a hydraulic brake for the autonomous underwater vehicles. Using the methods of the system analysis, a decomposition of the extreme requirements up to the level of the control functions and diagnostics of the steering gear was carried out. The methods and algorithms for control and diagnostics of the steering gear, a set of technological control and test equipment were developed. The novelty of the developed methods and algorithms for the control and diagnostics of the steering gear of the autonomous underwater vehicles is related to the formalization of the process of justification of the requirements to the use of the autonomous underwater vehicles, with transition from the requirements to the functions of the devices and, further, to the methods and algorithms of control and diagnostics of the steering gear. This allows us to reduce the probability of making wrong decisions at the stage of development of the equipment, which are the most frequent and lead to a significant increase of the cost and time of the research and development, and also create the technological equipment, methods and algorithms for control of the technical state and diagnostics of failures of a new type of the hybrid actuators — the electropneumatic steering gear with a hydraulic brake. For testing of the proposed approach an autonomous unmanned underwater vehicle, which moves in water at a depth up to 30 m with velocities over 100 km per hour, was considered. The control of the autonomous underwater vehicle is performed by two pairs of rudders, which, depending on the driving mode of the device, take position from 0 to 90 degrees relative to the vehicle hull.

Keywords: electropneumatic steering gear, steering gear, autonomous underwater vehicle, control system components

For citation:

Aliluev S. V., Bolshakov A. A., Popov A. N., Teterin D. P. Methods and Algorithms for Control and Diagnostics of the Steering Gear of the Autonomous Underwater Vehicles, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 4, pp. 264—269.

DOI: 10.17587/mau.18.264-269

References

1. Russian national security strategy until 2020. Presidential Decree of 12.05.2009, the number 537 (in Russian).
2. Novoselov B. V., Nikolaev V. Y. Concept development, construction and efficient use of service tools servo drives, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2013, no. 11, pp. 47—52 (in Russian).
3. Aliluev A. V., Aliluev S. V., Garanin I. V., Govorenko G. S., Petersburg A. I., Pistons V. A., Teterin D. P., Firsov V. M., Yashin A. G. Pneumohydraulic drive, *Patent for invention RU number 114738 F15B11/072*. from 23.12.2011 (in Russian).
4. Aliluev S. V., Balashov A. L., Pistons V. A., Teterin D. P. Steering gear selection procedure bodies councils-ment of autonomous underwater vehicle, *Bulletin of Samara Scientific Center of the*

Russian Academy of Sciences, 2016, no. 1 (2), vol. 18, pp. 140—144 (in Russian).

5. Teterin D. P. Synthesis of the requirements to the onboard information and measuring and modeling complex, *Informationally-Control Systems*, 2009, no. 1 (38), pp. 10—14 (in Russian).

6. Kostin A. V., Myagkich A. S., Poduraev Y. V., Yakovlev S. F. Methods of determining the basic parameters of electromechanical linear actuator direct, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2013, no. 10, pp. 27—31 (in Russian).

7. Bystrov L. G., Popov A. A., Teterin D. P. Methods of evaluation of the work-ability of the elements onboard aircraft control systems under arbitrary input disturbances, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2012, no. 12, pp. 56—61 (in Russian).

8. Safronov V. V., North A. A., Teterin D. P. Choosing the best all-rianta system of training and start-up of aircraft based on the method of ranking gipervektornogo, *Herald of Aerospace Defense*, 2015, no. 2 (6), pp. 99—104 (in Russian).

9. German-Galkin S. G., Zagashvili Y. V. Energy stands for the complex testing of electric drives, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2014, no. 2, pp. 39—44 (in Russian).

10. Kushnerik A. A., Kushne-Rick A. A., Mikhailov D. N., Sergeenko N. S. et al. Maritime robotic system, turn-conductive autonomous unmanned underwater vehicles and water, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2014, no. 3, pp. 67—72 (in Russian).