
УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

УДК 534.222

АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ¹

Старченко Ирина Борисовна, доктор технических наук, профессор, Южный федеральный университет, 347922, Российская Федерация, г. Таганрог, ул. Петровская, 99, e-mail: star@sfnedu.ru

Кириченко Игорь Алексеевич, кандидат технических наук, доцент, Южный федеральный университет, 347922, Российская Федерация, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2, e-mail: igork@fep.tti.sfnedu.ru

Сахаров Вадим Леонидович, кандидат технических наук, доцент, Южный федеральный университет, 347922, Российская Федерация, г. Таганрог, ул. Петровская, 99, e-mail: vadim@ritm.tti.sfnedu.ru

Голосов Петр Сергеевич, аспирант, Южный федеральный университет, 347922, Российская Федерация, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2, e-mail: ega@tti.sfnedu.ru

В реальных условиях становится все более необходимым построение оптимальных адаптивных гидроакустических средств, обеспечивающих минимальную погрешность при наличии переменных во времени влияющих воздействий. В работе рассматриваются вопросы современного состояния и перспективы развития адаптивных гидроакустических средств, основные направления их экспериментальных исследований, взаимодействие элементов в адаптивной гидроакустической системе. Исследована операторная схема гидролокации с использованием параметрических антенн в качестве источника звука. Показаны преимущества использования таких антенн в адаптивных гидроакустических системах. Определен круг моделей адаптивных систем и описаны методы их экспериментальных исследований. Результаты рассмотрения адаптивных методов управления гидроакустической системой и лабораторные исследования характеристик параметрической антенны подтверждают целесообразность управления структурой основной измерительной системы за счет данных, получаемых из морской среды.

Ключевые слова: адаптивность, гидроакустическая система, структура, параметрическая антенна, гидролокация, управление, модели адаптивных систем

ADAPTIVE CONTROL OF SONARS

Starchenko Irina B., D.Sc. (Engineering), Professor, Southern Federal University, 99 Petrovskaya St., Taganrog, 347922, Russian Federation, e-mail: star@sfnedu.ru

Kirichenko Igor A., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Southern Federal University, 2 Shevchenko St., Taganrog, 347922, Russian Federation, e-mail: igork@fep.tti.sfnedu.ru

Sakharov Vadim L., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Southern Federal University, 99 Petrovskaya St., Taganrog, 347922, Russian Federation, e-mail: vadim@ritm.tti.sfnedu.ru

Golosov Petr S., post-graduate student, Southern Federal University, 2 Shevchenko St., Taganrog, 347922, Russian Federation, e-mail: ega@tti.sfnedu.ru

In reality, it becomes necessary to construct optimal adaptive sonar equipment to ensure minimum error in the presence of time-varying effects affecting. The paper discusses the current state of adaptive sonar

¹ Работа выполнена при поддержке Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг., соглашение № 14.A18.21.1284.

equipment and development prospects, the main lines of experimental research models of adaptive sonar equipment, the interaction of the elements in the adaptive sonar system. We consider the operator scheme using parametric sonar antenna as the source. The advantages of parametric adaptive antennas in sonar systems were considered. A circle of models of adaptive systems is determined and the methods of experimental research are described. The results of the adaptive management principles of sonar system characteristics and laboratory studies of the parametric array characteristics confirm the value of main measuring system structure control with data obtained from the marine environment.

Keywords: adaptability, sonar system, structure, parametric array, hydrolocation, control, adaptive system models

Вопросы адаптивного управления гидроакустическими системами (ГАС), в частности, с использованием параметрических антенн остаются исследованными недостаточно полно. Поэтому в настоящей статье ставилась цель рассмотреть особенности работы ГАС с использованием параметрических антенн и обобщить имеющиеся разработки.

Гидроакустические системы – профилографы, гидролокаторы бокового обзора, эхолоты – уже давно перестали быть средством только научных исследований. В настоящее время, объединяя в себе функции обычного эхолота и устройства, визуализирующего придонные и поддонные структуры, они являются мощным инструментом для проведения поисковых, контрольных, проектно-изыскательских, осмотровых, промерных работ в акваториях морских портов, в руслах рек, в шельфовой зоне. ГАС могут использоваться как самостоятельно, так и в составе гидрографических комплексов. В частности, гидроакустические профилографы (рис. 1) уже стали фактически единственным средством визуализации структуры донных отложений, поиска и оконтуривания заиленных и придонных объектов, включая нефте- и газопроводы, другие потенциально опасные объекты.

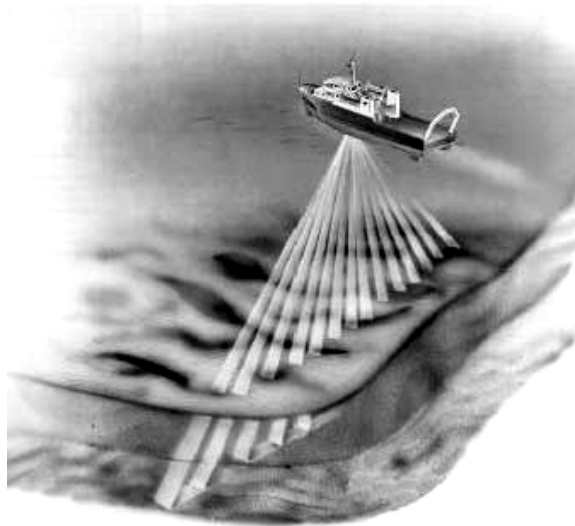


Рис. 1. Иллюстративная схема работы гидроакустического профилографа

В последнее время актуальность создания техники донного профилирования возрастает в связи с дальнейшим освоением шельфовых территорий морей и океанов, в том числе в Южном федеральном округе (ЮФО), в северной части Каспийского моря. Разработка месторождений углеводородного сырья, прокладка газо- и нефтепроводов («Северный поток», «Голубой поток», «Южный поток» и др.) потребует дополнительного привлечения техниче-

ских средств донного профилирования. В первую очередь это гидролокаторы-профилографы, дающие возможность с высоким пространственным разрешением получать профиль донной поверхности, обнаруживать и оконтуривать придонные и заиленные объекты, в том числе и малых размеров. Все большую актуальность приобретает задача дистанционной классификации типа грунта на дне водного объекта, особенно при производстве геологоразведочных и гидротехнических работ. Такая классификация (диагностика) локальных участков грунта может быть полезна и при выборе мест взятия «донных проб» при гидробиологических исследованиях, оптимизации размещения объектов «морской аквакультуры» и пр.

Ухудшение экологической обстановки, связанное с дальнейшим развитием технологий и производств, добычей, транспортировкой и сжиганием углеводородного сырья, в том числе и на шельфовых территориях морей и океанов, требует создания техники и разработки технологий мониторинга подводных трубопроводов и других размещаемых на шельфе инженерно-технических сооружений.

В таких условиях *актуальным* становится создание многофункциональных профилографов для прецизионной стратификации донных осадков, классификации типа грунта, поиска придонных и заиленных объектов, представляющих потенциальную опасность.

Наиболее перспективным направлением в технике зондирования морского дна является создание профилографов, работающих на принципах нелинейной акустики, – они получили название параметрических профилографов [3]. Эти приборы сочетают в себе все уникальные свойства параметрических антенн – отсутствие боковых лепестков характеристики направленности, малогабаритность антенны, возможность перестройки частоты и др. Перечисленные свойства позволяют в отличие от обычных линейных систем не только обнаруживать акустические неоднородности, но и определять их координаты, производить классификацию по геометрическим признакам. Это делает параметрические профилографы незаменимым инструментом при обследовании трубопроводов и других заиленных объектов природного и техногенного происхождения.

В параметрических акустических приборах в качестве излучателя используются параметрические антенны накачки, обеспечивающие необходимый для нелинейного взаимодействия акустических волн уровень первичного поля.

Параметрическая антенна представляет собой совокупность пьезоэлектрического преобразователя волн накачки (высокочастотных акустических волн, близких по частоте) и участка водной среды, прилегающего к антенне, в котором происходит взаимодействие высокочастотных (ВЧ) акустических волн, излученных в среду. В силу нелинейности водной среды происходит трансформация спектра исходного излучения, и в среде образуется волна с частотой равной разности частот ВЧ волн. Эта частота является более низкой по отношению к частотам исходных волн и является основной рабочей для параметрической антенны.

Использование в режиме излучения параметрической антенны позволяет применять широкополосное излучение на низких, глубоко проникающих в грунт частотах при сравнительно небольших размерах антенны. Конструкция параметрического прибора и основные параметры антенны накачки с учетом массогабаритных и технологических показателей определяются назначением и условиями эксплуатации. Ширина характеристики направленности антенны на частотах накачки определяется из условий обеспечения необходимого энергетического потенциала параметрического профилографа и требуемого разрешения в горизонтальной и вертикальной плоскостях с учетом электронной компенсации качки судна.

Рассмотрение параметрических антенн, находящихся в составе гидроакустических комплексов предназначенных для исследования водной среды, гидролокации, звукоподводной связи и др., необходимо проводить с учетом вероятностного характера используемых гидроакустических сигналов. Моделирование процессов нелинейного распространения звука может оказать помощь исследователю, так как проведение экспериментов в натуральных ус-

ловиях не всегда возможно и/или имеет определенные ограничения. Водная экосистема представляет собой сложную среду, характеризующуюся совокупностью параметров, которые зачастую имеют не детерминированный, а постоянно изменяющийся характер. Поэтому вероятностный подход к оценке характеристик антенн, которые напрямую зависят от свойств среды распространения звука, в данном случае оправдан и является единственно правильным.

Вопросы адаптивного управления гидроакустическими системами, в частности, с использованием параметрических антенн, остаются исследованными недостаточно полно. Поэтому в настоящей статье ставилась цель рассмотреть особенности работы ГАС с использованием параметрических антенн и обобщить имеющиеся разработки.

Рассмотрим вначале в общем виде гидролокационную систему. Она представляет собой совокупность средств гидролокации и среды распространения звука. В линейном случае среда учитывается искажениями, вносимыми в сигнал, реверберационной помехой и др. В случае параметрической гидролокации на среду накладывается дополнительная важная функция формирования самой параметрической антенны. Схему параметрической гидролокации можно изобразить в виде, показанном на рис. 2.

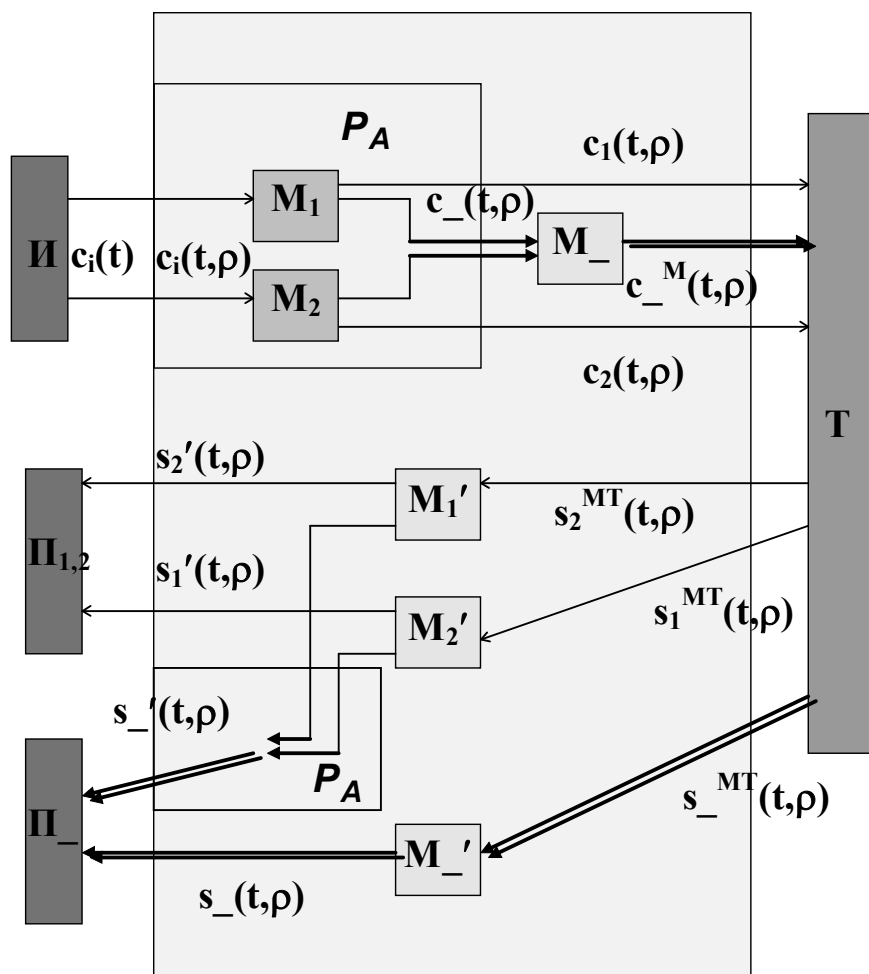


Рис. 2. Детализированная схема параметрической гидролокации

Здесь $c_i(t, \rho) = A c_i(t)$ – сигнал, излученный в среду; I – оператор излучателя; $c_i(t)$ – электрический сигнал, подаваемый на гидроакустический преобразователь; $\rho = \rho(x, y, z)$ – переменная плотность.

Пусть P_A – оператор, учитывающий нелинейное взаимодействие. Тогда

$$P_A = [c_1(t, \rho) \cdot c_2^*(t, \rho)] = c_-(t, \rho) \quad (1)$$

– модель двухчастотного взаимодействия; $c_-(t, \rho)$ – сигнал разностной частоты.

При локации в ближней зоне на объект T попадают сигналы как разностной $c_-^M(t, \rho)$, так и исходных частот $c_1^M(t, \rho)$ и $c_2^M(t, \rho)$, которые можно записать как

$$c_1^M(t, \rho) = M_1 c_1(t, \rho); \quad (2)$$

$$c_2^M(t, \rho) = M_2 c_2(t, \rho), \quad (3)$$

где M_1, M_2 – операторы, учитывающие искажение сигналов по пути распространения.

Вблизи объекта T после отражения и рассеяния будет существовать набор сигналов: эхо-сигнал разностной частоты $s_-^M(t, \rho)$ и эхо-сигналы частот накачки, которые определяются как

$$s_1^{MT}(t, \rho) = T c_1^M(t, \rho); \quad (4)$$

$$s_2^{MT}(t, \rho) = T c_2^M(t, \rho), \quad (5)$$

где T – оператор свойств объекта.

Сигналы частот накачки $s_1^{MT}(t, \rho)$ и $s_2^{MT}(t, \rho)$, взаимодействуя друг с другом, образуют сигнал разностной частоты $s_-'(t, \rho)$. С учетом искажений сигналов M_1' и M_2' , а также оператора нелинейного взаимодействия P_A , можно последовательно записать

$$S_1(t, \rho) = M_1' s_1^{MT}(t, \rho) = M_1' T c_1^M(t, \rho) = M_1' T M_1 c_1(t, \rho); \quad (6)$$

$$S_2(t, \rho) = M_2' s_2^{MT}(t, \rho) = M_2' T c_2^M(t, \rho) = M_2' T M_2 c_2(t, \rho); \quad (7)$$

$$S_-'(t, \rho) = P_A [S_1(t, \rho) s_2^*(t, \rho)] = P_A [M_1' T M_1 c_1(t, \rho); \quad (8)$$

$$M_2' T M_2 c_2(t, \rho)] = T^2 M_- ' M_- c_-(t, \rho) = T^2 M_- ' c_-^M(t, \rho), \quad (9)$$

где $s_1(t, \rho)$ и $s_2(t, \rho)$ – эхо-сигналы исходных частот с учетом искажений; $s_-'(t, \rho)$ – результат взаимодействия сигналов $s_1(t, \rho)$ и $s_2(t, \rho)$; M_- – оператор, учитывающий искажение сигналов разностной частоты по пути распространения

Суммарный сигнал разностной частоты на приемнике Π_- определится как

$$s_2(t, \rho) = s_-(t, \rho) + s_-'(t, \rho) = T M_- ' c_-^M(t, \rho) + T^2 M_- ' c_-^M(t, \rho) = T M_- ' c_-^M(t, \rho) [1 + T] = s_-(t, \rho) [1 + T]. \quad (10)$$

При переходе от операторного описания к вероятностной модели можно использовать различные модели гидроакустических сигналов: каноническую и параметрическую – для случая неоднородной среды распространения; аддитивно-мультипликативную – в условиях рассеяния волн и движения объектов локации; комплексное представление – для всестороннего анализа.

Адаптивность рассматриваемой системы определяется ее способностью эффективно выполнять заданные функции в определенном диапазоне изменяющихся условий. Чем относительно шире этот диапазон, тем более адаптивной считается структура. Данный показатель можно представить как уровень, при котором система реагирует на изменения ее внутренней и внешней среды. Обычно при рассмотрении ГАС под адаптивностью понимают применение адаптивных алгоритмов обработки информации в электроакустическом тракте системы применительно к физическим условиям и типовым ситуациям, характерным для гидроакустики или на программном уровне. Особое значение условия адаптивности системы представляют для измерительных систем с параметрической излучающей антенной. Адаптивные ГАС (АГАС), использующие принцип параметрической гидролокации, описанный выше, позволяют использовать морскую среду для управления характеристиками системы, поскольку сама антенна формируется, как было раньше сказано, в среде распространения звуковых волн. С другой стороны, изменения характеристик параметрической антенны, таких как характеристика направленности, уровень звукового давления на оси и др., мо-

гут свидетельствовать об изменении гидрофизических свойств морской среды, таких как плотность, соленость, скорость звука. Изменения свойств в пределах рабочего диапазона глубин могут быть связаны с изменением экологической обстановки. Таким образом, с помощью адаптивных ГАС можно проводить и дистанционный мониторинг состояния окружающей водной среды.

Адекватность теоретических моделей [3, 5, 6] должна быть подтверждена экспериментальными исследованиями. Систематизация направлений и задач экспериментальных исследований моделей АГАС с параметрическими антеннами представлена на рис. 3.

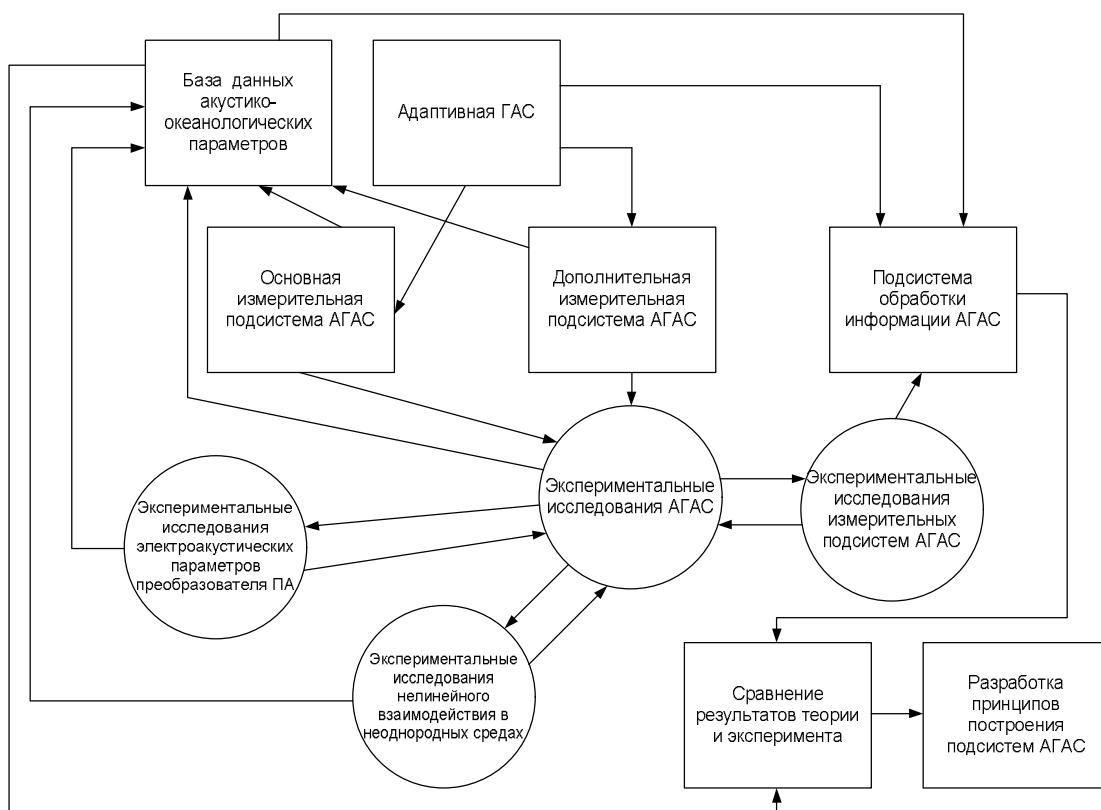


Рис. 3. Основные направления экспериментальных исследований моделей адаптивных гидроакустических средств

В реальных условиях при заданных ограничениях становится необходимым построение оптимальных АГАС, обеспечивающих минимальную погрешность при наличии переменных во времени влияющих воздействий [4, 7, 8]. Критерий оптимальности характеризует цель, которую должна достичь синтезируемая АГАС по своим основным (определяющим) показателям качества при заданных ограничениях. Критерий должен по возможности полно и точно характеризовать качество системы. Выбирая критерий, приходится решать задачу на оптимум, учитывая два противоречивых фактора: сложность критерия; полноту и точность отображения им назначения системы. Чем полнее и точнее критерий отображает систему, тем он сложнее.

Таким образом, можно сделать следующие *выводы*.

Задача построения АГАС разбивается на две составляющие: оптимизация параметров аппаратуры на этапе проектирования; собственно, адаптация системы в реальных усло-

виях. Проводить оптимизацию параметров аппаратуры на этапе проектирования следует в соответствии с совокупностью обобщённых исходных данных, приведенных выше. Необходимо оптимизировать следующие параметры АГАС [1, 2]:

- теоретические характеристики излучающей антенны, а именно должно быть проведено обоснование выбора: ширины характеристики направленности в соответствии с поставленной задачей локации, с учетом функционирования АГАС в реальных условиях; типа излучающей антенны и её конструкции;
- энергетические характеристики излучающего тракта, для чего необходимо определить акустическую мощность, требуемую для решения поставленных задач (в соответствии с расчётной дальностью действия и затуханием звука в воде на рабочих частотах АГАС);
- тактические характеристики: необходимо провести обоснование выбора рабочих частот АГАС, разрешающей способности, дальности действия, следствием чего является разбиение на дискретные режимы по дистанции, а значит и по мощности. Также необходимо провести оценку ширины пропускания приёмного тракта, динамического диапазона принимаемых эхо-сигналов, коэффициента усиления приёмного тракта и используемого закона временной автоматической регулировки усиления (ВАРУ) и др.

Результаты рассмотрения адаптивных принципов управления АГАС, лабораторные исследования характеристик параметрической антенны подтверждают целесообразность управления структурой основной измерительной системы за счет данных, полученных дополнительной измерительной системой, которая позволяет определять и учитывать особенности натуральных условий функционирования АГАС в реальном масштабе времени. Результаты, полученные дополнительной системой, могут использоваться основной системой для корректировки проводимых измерений.

Список литературы

1. Бублей И. Е. Информационная модель гидролокации и адаптивные принципы управления / И. Е. Бублей, И. А. Кириченко, И. Б. Старченко // Труды Конгресса по интеллектуальным системам и информационным технологиям «AIS-IT'10»: в 4 т. – Москва : Физматлит, 2010. – Т. 2. – С. 35–40.
2. Кириченко И. А. Метод декомпозиции в построении адаптивных гидроакустических систем / И. А. Кириченко, И. Б. Старченко // Инженерный вестник Дона. – Ростов-на-Дону. – 2012. – № 4. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n4y2012/1139/> (дата обращения 14.10.2012), свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
3. Новиков Б. К. Параметрические антенны в гидролокации / Б. К. Новиков, В. И. Тимошенко. – Ленинград : Судостроение, 1983. – 256 с.
4. Ольшевский В. В. Статистические методы в гидролокации / В. В. Ольшевский. – Ленинград : Судостроение, 1973. – 184 с.
5. Чувькин Б. В. Анализ устойчивости периодических колебаний в нелинейных непрерывно-дискретных системах / Б. В. Чувькин, И. А. Долгова, А. В. Еременко // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2013. – № 1.
6. Якунин П. С. Анализ характеристик гауссовских условно нестационарных процессов в задачах имитационного моделирования систем / П. С. Якунин, Г. Г. Ягудаев, С. Н. Сатышев, А. А. Котов, Р. Г. Жигарев // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2011. – № 3. – С. 85–93.
7. Sibul L. H. Environmentally adaptive signal processing / L. H. Sibul, T. L. Dixon // J. Acoust. Soc. Am. – 1997. – Vol. 101, issue 5. – P. 3157–3157.
8. Starchenko I. B. Decomposition method in constructing simulation models of parametric location for statistically irregular mediums / I. B. Starchenko // JASA. – 2005. – April. – Vol. 117, no. 4. – P. 2576.

References

1. Bublely I. E., Kirichenko I. A., Starchenko I. B. Informatsionnaya model gidrolokatsii i adaptivnye printsipy upravleniya [Information model of hydrolocation and adaptive control principles]. *Trudy Kongressa po intellektualnym sistemam i informatsionnym tekhnologiyam* [Proceedings of Congress on Intellectual Systems and Information Technologies «AIS-IT'10»], in 4 vol. Moscow, 2010, vol. 2, pp. 35–40.

2. Kirichenko I. A., Starchenko I. B. Metod dekompozitsii v postroenii adaptivnykh gidroakusticheskikh sistem. [Decomposition method in the construction of adaptive hydroacoustical systems]. *Inzhernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of Don]. Rostov-on-Don, 2012, no. 4. Available at: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n4y2012/1139/>, accessed 14 October 2012.

3. Novikov B. K., Timoshenko V. I. *Parametricheskie anteny v gidrolokatsii* [Parametric arrays in hydrolocation]. Leningrad, Shipbuilding, 1983. 256 p.

4. Olshevskiy V. V. *Statisticheskie metody v gidrolokatsii* [Statistical methods in hydrolocation]. Leningrad, Shipbuilding, 1973. 184 p.

5. Chuvykin B. V., Dolgova I. A., Eremenko A. V. Analiz ustoychivosti periodicheskikh kolebaniy v nelineynykh nepreryvno-diskretnykh sistemakh [Analysis of stability of periodical vibrations in non-linear continuous-discrete systems]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Management and High Technologies], 2013, no. 1.

6. Yakunin P. S., Yagudaev G.G., Satyshev S. N., Kotov A. A., Zhigarev R. G. Analiz kharakteristik gaussovskikh uslovno nestatsionarnykh protsessov v zadachakh imitatsionnogo modelirovaniya sistem [Analysis of Gaussian conditionally non-stationary processes characteristics in the problems of imitation system modeling]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Management and High Technologies], 2011, no. 3, pp. 85–93.

7. Sibul L. H., Dixon T. L. Environmentally adaptive signal processing. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1997, vol. 101, issue 5, pp. 3157–3157

8. Starchenko I. B. Decomposition method in constructing simulation models of parametric location for statistically irregular mediums. *JASA*, vol. 117, no. 4, pt. 2 of 2, April 2005, p. 2576.

УДК 681.51.012:004.8

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И МЕТОДОВ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ РАБОТОЙ АММИАЧНОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Путилин Сергей Сергеевич, аспирант, Астраханский государственный технический университет, 414057, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 16, e-mail: hak-ish@ya.ru

В работе рассмотрена задача обеспечения аммиачной холодильной установки (АХУ) дополнительным слоем защиты, который повысит безопасность ее функционирования и обеспечит оптимальные эксплуатационные параметры. Главной функцией нового слоя является контроль и безопасное управление холодильным процессом. При ограниченности ресурсов именно внедряемая интегрированная система идентификации эксплуатационных параметров (СИЭП) оптимизирует распределение усилий по обеспечению безопасности и эффективности работы АХУ. В работе проанализированы возможные состояния для автоматизированной системы управления АХУ, приведена модель процесса функционирования системы, управления противоаварийной защитой. Благодаря полученной математической модели по статистическим данным можно рассчитывать значение коэффициентов снижения риска, а также определять показатели безопасности. Показано, что использование СИЭП повышает общую безопасность эксплуатации АХУ и позволяет обеспечить выполнение условий оптимальности параметров.

Ключевые слова: модель, анализ, холодильная установка, идентификация, искусственный интеллект, база правил, безопасность, оптимальность, интегрированная система, система управления