

УДК 621.3.010 (31)

REDUNDANCY IN DYNAMIC POSITIONING SYSTEMS

ИЗБЫТОЧНОСТЬ В СИСТЕМАХ ДИНАМИЧЕСКОГО
ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

V.A.Bobyry, *PhD, associate professor*, **M.A.Musaev**, *senior lecturer*
В.А. Бобырь, *к.т.н., доцент*, **М.А. Мусаев**, *старший преподаватель*

Odessa National Maritime Academy, Ukraine
Одесская национальная морская академия, Украина

ABSTRACT

The question of ships with dynamic positioning system reliability on account of redundancy of subsystem elements of the dynamic positioning systems has been considered in the article. Two procedures have been developed: 1) estimation of reliability definition and control over the reliability in dynamic positioning systems with off-load elements; 2) reduction of characteristics of main and standby navigation position measurement equipment to the same measurement units.

Keywords: dynamic positioning system, redundancy, backing-up reliability, off-load elements, navigation position measurement equipment characteristics, measurement units.

Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными и практическими задачами

В последние годы системы динамического позиционирования (СДП) получили широкое распространение на судах в деле освоения и разведки морских углеводородных ресурсов, выполнения дноуглубительных, водолазных и кабелеукладочных работ, проведения исследовательских работ и т.п. Среди судов с СДП имеются также суда-снабженцы, заводчики якорей, укладчики кабелей, пассажирские суда, плавучие отели, военные корабли и др.

Аварии с судами с СДП (ССДП) могут иметь катастрофические последствия. Примеры таких аварий – взрыв и пожар на нефтяной платформе “Deerwater Horizon” 20 апреля 2010 г. в Мексиканском заливе на месторождении “Макондо”. Или посадка на камни и гибель пассажирского лайнера “Costa Concordia” 13 января 2012 года в Тирренском море.

Огромные объемы и разнообразие работ, выполняемых ССДП, растущее их число, недостаточная изученность вопросов эксплуатации ССДП, сложное высокотехнологичное оборудование, высокие требования к точности исполнения технологических процессов и т.п. требуют обеспечения высокой степени надежности СДП.

В настоящее время надежность оборудования СДП обеспечивается двумя путями - 1) определением с помощью компьютерной модели способности судна (Seapability Plot) удерживать заданное положение или место при

Одесская Национальная Морская Академия

изменении ветра, течения или выходе из строя элементов подсистем систем динамического позиционирования и 2) использованием избыточности в СДП (Redundancy) [1].

Под избыточностью понимается наличие и возможность использования тех резервных или дублирующих технических средств, единственный отказ которых может ухудшить способность ССДП удерживаться в заданном положении или месте. За счет избыточности можно обеспечить требуемую надежность подсистемы СДП даже в том случае, если надежность каждого из ее элементов не очень высока. В настоящее время избыточность устанавливается в соответствии с требованиями классификационного общества [2].

Однако, ни определение теоретической способности ССДП, ни наличие количественной избыточности в элементах судовых подсистем ССДП еще не означает, что его способность удерживаться в заданном положении или в заданном месте будет гарантирована с требуемой степенью надежности, поскольку надежность СДП должна определяться в зависимости от надежности каждого из элементов судовых подсистем - основных и резервных.

Кроме того, многие резервные технические средства основаны на разных физических принципах и показатели результата их функционирования могут быть выражены в разных единицах измерения. Однако в СДП эти показатели должны быть выражены в одинаковых единицах измерения.

Анализ последних достижений и публикаций, в которых начато решение данной проблемы, и выделение нерешенных ранее частей общей проблемы

Общие теоретические и практические вопросы повышения надежности сложных систем за счет избыточности их подсистем описаны в литературе достаточно полно [3], [4]. Однако вопросы, связанные с определением и контролем над надежностью в случае использования избыточности на ССДП в зависимости от надежности элементов подсистем СДП, не получили достаточного освещения.

Для избыточности в СДП используются абсолютные и относительные системы определения положения и места. Так в абсолютных навигационных системах место ССДП определяется, как географические координаты, в которой единицей измерения расстояния является морская миля. А в относительных – как направление и расстояние до какого-нибудь заданного ориентира. В абсолютных системах определения положения и места судна используется географическая система координат, а в относительных - метрические системы, например, такая как Universal Transverse Mercator (UTM) [5]. Для связи географических координат с метрическими применяются

достаточно сложные методы с громоздкими математическими моделями, что влияет на надежность всей системы контроля. Поэтому требуется их упрощение.

Формулирование целей статьи и постановка задачи

Целью настоящей статьи является определение путей обеспечения надежности ССДП за счет избыточности элементов подсистем СДП. А задачи – разработать методики: 1) определения оценки надежности и контроля над ней в случае использования избыточности в СДП в зависимости от надежности основных и резервных элементов подсистем СДП; 2) приведения показателей основных и резервных навигационных систем определения положения и места в СДП к одинаковым единицам измерения.

Изложение материала исследования с обоснованием полученных научных результатов

Система динамического позиционирования (СДП) – это комплекс подсистем, которые взаимодействуют для автоматического или ручного удержания судна с системой динамического позиционирования (ССДП) в заданном положении или в заданном месте. К таким подсистемам СДП относятся (рис.1): 1) силовая установка; 2) подруливающие устройства; 3) электрогенераторы; 4) оборудование для определения положения или места судна; 5) средства контроля, включая компьютер с программами; 6) датчики; 7) операторы СДП при ручном управлении.

Согласно требованиям циркуляра IMO MSC №.645 все ССДП делятся на три класса: ДП класс 1, ДП класс 2 и ДП класс 3. В основе такой классификации лежит критерий отказа одного элемента (Single Failure) любой судовой подсистемы, который может привести к снижению или потере способности судна удерживаться в заданном положении или в заданной точке [2]. Для исключения этого вводятся требования к избыточности элементов судовых подсистем ОССДП. У ССДП с классом 1 избыточность устанавливается в соответствии с требованиями к основному классу судна. Для ОССДП класса 2 избыточность должна быть у всех действующих (активных) элементов и у определенных статических элементов. У ССДП с классом 3 - избыточность устанавливается для всех элементов с их физическим разделением друг от друга.

На рис.1 приведен пример ССДП, в которой избыточными являются подруливающие устройства (Thrusters), винты (Propellers), рули (Rudders), средства контроля (Housings & Operator Consoles), оборудование для определения положения и места судна (DGPS, Hydroacoustic, Sunbeam, Gyros) и т.п.

В СДП избыточность достигается за счет структурного резервирования. При этом в структуру СДП вводятся дополнительные элементы, выполняющие функции основных элементов в случае их отказа. Характеристикой структурного резервирования является кратность резервирования - отношение

числа резервных элементов к числу резервируемых ими основных элементов, выраженное несокращаемой дробью - 2:3, 4:2 и т.д.

Основным видом структурного резервирования СДП является функциональное резервирование, а основным способом - общее резервирование, при котором резервируется подсистема в целом. Для включения резервного элемента в СДП используется динамическое резервирование замещением, при котором при отказе основного элемента происходит перестройка структуры СДП и функции после этого передаются резервному.

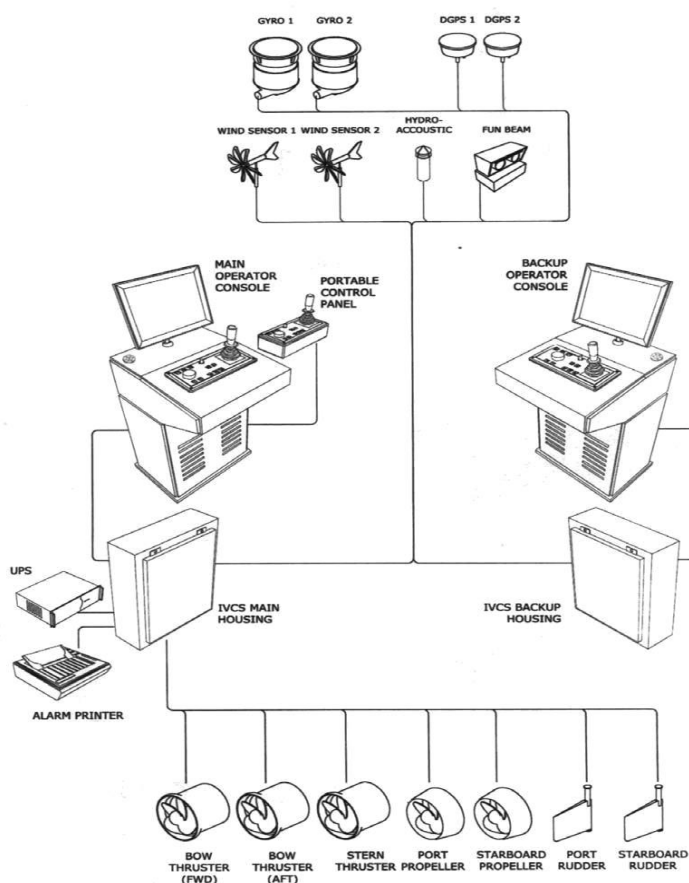


Рис.1. Схема комплектации СДП для судна класса ДП 2

В СДП встречаются нагруженное, ненагруженное и облегченное резервирование.

При нагруженном резервировании резервные элементы работают в режиме основных как до, так и после их отказа. Поэтому надежность резервных элементов не зависит от момента их перехода из резервного состояния в основное и равна надежности основных элементов.

При ненагруженном резервировании резервные элементы последовательно включаются в работу при отказе основного. Ненагруженное резервирование в различных системах встречается наиболее часто, т. к. оно по сути аналогично замене отказавших элементов и узлов на запасные.

Облегченное резервирование используется при большой инерционности переходных процессов, происходящих в элементе при его переходе из резервного в основной режим, и нецелесообразности применения нагруженного

резервирования из-за недостаточного выигрыша в надежности. Очевидно, облегченный резерв занимает промежуточное положение между нагруженным и ненагруженным.

Для оценки надежности избыточности СДП в качестве примера рассмотрим подсистему СДП с ненагруженным (холодным) резервированием.

Пусть подсистема СДП состоит из основного элемента A_1 и двух резервных - A_2 и A_3 . При отказе элемента A_1 в работу включается A_2 , при отказе элемента A_2 – включается A_3 . Кратность резервирования в этом случае 2:1. Поскольку до включения каждый из резервных элементов находится в ненагруженном (холодном) резерве, то вероятность их отказа очень мала. Интенсивность отказов основного элемента всегда будет отличаться от интенсивностей отказов резервных элементов. Примем ее равной λ_1 , а резервных - $\lambda_2 = \lambda_3$.

Чтобы определить надежность этой подсистемы СДП, необходимо установить, какими свойствами будет обладать поток отказов в ней.

Первое свойство – это то, что вероятность попадания того или иного числа отказов в подсистеме СДП за элементарный период времени длиной t будет зависеть только от величины этого периода и не зависит от того, где именно на временной оси расположен этот период. Такое свойство называется стационарным.

Второе свойство заключается в том, что для любых непересекающихся периодах времени число отказов в подсистеме СДП, попадающих на один из них, не зависит от того, сколько отказов попало на другой. Это понятно, поскольку работающий элемент в подсистеме СДП после его отказа больше работать не будет. Это свойство называется потоком без последействия.

Третье свойство вытекает из того, что у подсистемы СДП с ненагруженным резервированием вероятность попадания в элементарный период времени двух или более отказов пренебрежимо мала по сравнению с вероятностью попадания одного отказа, поскольку два элемента всегда остаются неработающими. Такое свойство называется ординарным.

Итак, полученные нами свойства потока отказов в рассматриваемой подсистеме СДП соответствуют пуассоновскому потоку отказов [6].

В качестве показателя надежности выберем вероятность безотказной работы подсистемы СДП с избыточностью в течение времени t . Тогда для определения надежности подсистемы СДП представим процесс, протекающий в ней, как Марковский случайный процесс с непрерывным временем и с дискретными состояниями, который можно охарактеризовать так: 1) работает элемент A_1 ; 2) работает элемент A_2 ; 3) работает элемент A_3 ; 4) не работает ни один элемент. Для определения этих состояний воспользуемся системой уравнений Колмогорова [7]:

$$\frac{dp_1}{dt} = -\lambda_1 p_1; \quad (1)$$

$$\frac{dp_2}{dt} = -\lambda_2 p_2 + \lambda_1 p_1; \quad (2)$$

$$\frac{dp_3}{dt} = -\lambda_2 p_3 + \lambda_2 p_2; \quad (3)$$

$$\frac{dp_4}{dt} = -\lambda_2 p_3, \quad (4)$$

где t – время наработки до отказа; p_1, p_2, p_3, p_4 – вероятности того, что 1-й, 2-й, 3-й и 4-й элементы будут безотказно работать в течение времени t , при этом $p_1 + p_2 + p_3 + p_4 = 1$, а $p_4 = 1 - (p_1 + p_2 + p_3)$. Исходя из этих условий, вероятность безотказной работы подсистемы СДП с избыточностью в течение времени t равна:

$$P(t) = p_1 + p_2 + p_3. \quad (5)$$

При начальном условии $p_1(0) = 1$ из уравнения (1) находим:

$$p_1 = \exp(-\lambda_1 t). \quad (6)$$

Интегрирование уравнений (2) и (3) с начальными условиями $p_2(0) = 0$ и $p_3(0) = 0$ дает:

$$p_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} [\exp(-\lambda_1 t) - \exp(-\lambda_2 t)], \quad (7)$$

и

$$p_3 = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{(\lambda_2 - \lambda_1)^2} [\exp(-\lambda_1 t) - \exp(-\lambda_2 t)] - \frac{\lambda_1 \lambda_2 t}{\lambda_2 - \lambda_1} \exp(-\lambda_2 t). \quad (8)$$

Тогда с учетом уравнений (5) – (8) вероятность безотказной работы подсистемы СДП с двумя незагруженными резервными элементами за время t определится по формуле:

$$P(t) = \exp(-\lambda_1 t) + \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} [\exp(-\lambda_1 t) - \exp(-\lambda_2 t)] + \frac{\lambda_1 \lambda_2}{(\lambda_2 - \lambda_1)^2} [\exp(-\lambda_1 t) - \exp(-\lambda_2 t)] - \frac{\lambda_1 \lambda_2 t}{\lambda_2 - \lambda_1} \exp(-\lambda_2 t). \quad (9)$$

Итак, выражение (9) позволяет получить количественную оценку фактической надежности подсистемы СДП, работающей в режиме избыточности, для заданного периода времени работы при известных интенсивностях отказов ее элементов. Эта оценка фактической надежности может оказаться меньше требуемой величины.

В промышленности вероятность, как показатель надежности технических средств, задается. Она называется доверительной вероятностью. Так, для радионавигационных систем, используемых в судовождении, Резолюциями ИМО А.915(22) и А.953(23), установлена доверительная вероятность на уровне «две сигмы» - 0,95 (здесь «сигма» – среднеквадратическое отклонение

погрешности измерений). В других отраслях промышленности доверительная вероятность в зависимости от требований к надежности может устанавливаться на уровне «трех сигм» - 0,997 и даже «шести сигм» - 0,999997.

Если фактическая надежность подсистемы СДП меньше доверительной вероятности, то в условиях судна изменить ее практически невозможно. В этом случае за счет уменьшения другого показателя надежности, который поддается контролю - времени работы до отказа, можно обеспечить требуемую доверительную вероятность.

Для определения методов контроля над временем работы до отказа в качестве примера рассмотрим ту же подсистему СДП - с ненагруженным резервированием и с кратностью 2:1. Примем, что в СДП заданная доверительная вероятность равна 0,95, а интенсивность отказов обоих резервных элементов - λ .

Для пуассоновского потока отказов вероятность числа отказов n при наработке до отказа T при заданной интенсивности отказов λ равна:

$$P(T)_n = \frac{(\lambda T)^n}{n!} e^{-\lambda T}. \quad (10)$$

События отказов элементов подсистемы СДП с ненагруженным резервированием с точки зрения теории вероятностей являются несовместными. Тогда вероятность того, что число отказов элементов в подсистеме СДП будет не больше числа резервных элементов – $n = 2$, равна удвоенному значению выражения (11):

$$P(T)_2 = (\lambda T)^2 \cdot e^{-\lambda T}. \quad (11)$$

Подставив в (12) $P(T)_2 = 0,95$, получим выражение, из которого можно определить, при каком времени наработки до отказа T элементов в подсистеме СДП заданная доверительная вероятность будет обеспечена:

$$(\lambda T)^2 \cdot e^{-\lambda T} = 0,95. \quad (13)$$

Время работы элементов в подсистеме СДП всегда регистрируется. Поэтому при наработке элементов в подсистеме СДП до расчетного времени T необходимо принимать соответствующие меры по уменьшению интенсивности отказов элементов.

Таким образом, обеспечить контроль над надежностью подсистемы СДП в пределах доверительной вероятности можно на основе экспоненциальных уравнений (9) и (12), которые решаются с помощью MathCad в компьютерной системе контроля СДП.

В случае установки на ССДП нескольких систем определения положения и места судна с показателями результата их функционирования, выраженными в разных единицах измерения, появляется необходимость их унификации. В качестве примера рассмотрим случай оборудования судна навигационными системами – спутниковой DGPS, микроволновой Artemis и гидроакустической SSBL. В DGPS положение судна определяется в виде географических

координат. В системе Artemis положение судна определяется относительно стационарного ориентира (Fix Station) в виде расстояния и пеленга до него, а в SSBL – в виде расстояния и направления до стационарного ориентира (Transponder).

Поэтому для обеспечения функционирования избыточности необходимо выразить результаты измерений с помощью этих систем через координаты их стационарных ориентиров. Это позволит получить координаты места судна, определенные по DGPS и с помощью систем Artemis или SSBL, выраженные в одинаковых единицах – географических координатах. Для этого воспользуемся методом засечек. Засечкой называется метод определения координат отдельной точки измерением элементов, связывающих ее положение с исходными пунктами [8].

В системе Artemis (рис.2) между микроволновыми антеннами неподвижной (FAU) и подвижной (MAU) установлена постоянная связь. Они параллельны друг к другу и перпендикулярны к линии, соединяющей их. Неподвижная антенна (FAU) всегда указывает направление на центр подвижной антенны (MAU) относительно ориентира, координаты которого известны. Расстояние между антеннами определяется на основе измерения времени прохождения сигнала от подвижной антенны (MAU) к неподвижной антенне (FAU) и обратно. В момент начала работы системы Artemis координаты подвижной антенны (MAU), то есть, судна известны.

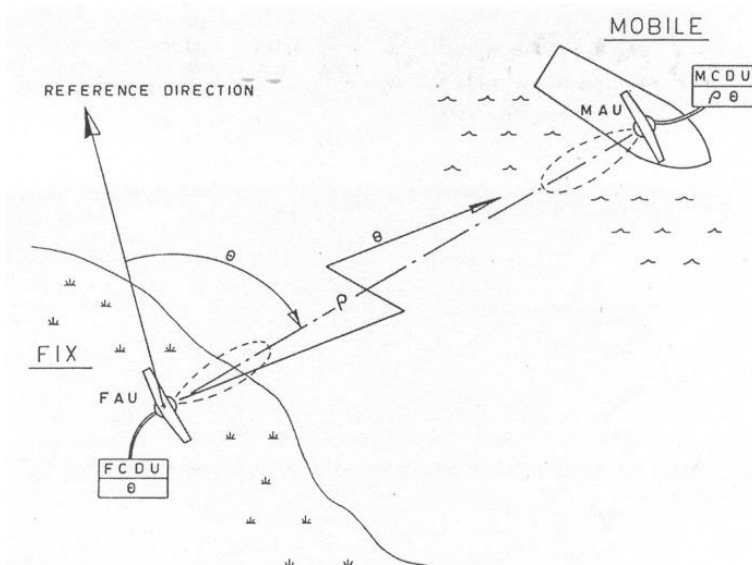


Рис.2. Схема работы микроволновой системы определения относительного положения судна Artemis.

Для связи географических координат подвижной антенны с координатами неподвижной антенны рассмотрим схему работы микроволновой системы определения относительного положения судна Artemis (рис.3). На этой схеме исходные пункты: 1) О – неподвижная антенна с координатами φ_0 и λ_0 и 2) А – место судна в момент начала наблюдений с известными координатами φ_A и λ_A ; В – место судна, координаты которого необходимо определить; $AO = \rho_0$ – расстояние между исходными пунктами; $BO = \rho_1$ – измеренное расстояние; θ_0

и Θ_A – исходные известные углы; Θ_B – измеренный угол; $\Delta\Theta = \Theta_B - \Theta_A$ – разность между измеренным и исходным углами; $AB = \rho_2$ – расстояние между токами В и А, рассчитывается в зависимости от ρ_1 и $\Delta\Theta$; BD – разность широт и AD – разность долгот точек А и В.

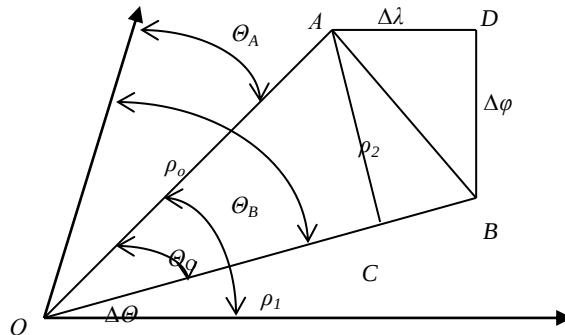


Рис.3. Схема микроволновой системы Artemis для определения координат судна.

Для определения координат точки В используется линейная засечка. Для этого (рис.3): 1) с помощью системы Artemis измеряют угол Θ_B и расстояние ρ_1 (если расстояние ρ_1 измерено в километрах, то километры переводятся в морские мили делением на 1,852); 2) из треугольников OAB и ABC вычисляют расстояние ρ_2 ; 3) вычисляют дирекционный угол BAD: $\alpha = 180^\circ - \Theta_B - \Theta_A - \Theta_O$; 4) по формулам прямой геодезической задачи определяются искомые координаты, как $\varphi_B = \varphi_A \pm \rho_2 \sin \alpha$ и $\lambda_B = \lambda_A \pm \rho_2 \cos \alpha$, которые в данном случае в конечном виде после анализа на знаки равны:

$$\varphi_B = \varphi_A - \cos \alpha \sqrt{\rho_0^2 \sin^2 \Delta\Theta + (\rho_1 - \rho_0 \cos \Delta\Theta)^2}, \quad (14)$$

$$\lambda_B = \lambda_A + \sin \alpha \sqrt{\rho_0^2 \sin^2 \Delta\Theta + (\rho_1 - \rho_0 \cos \Delta\Theta)^2}. \quad (15)$$

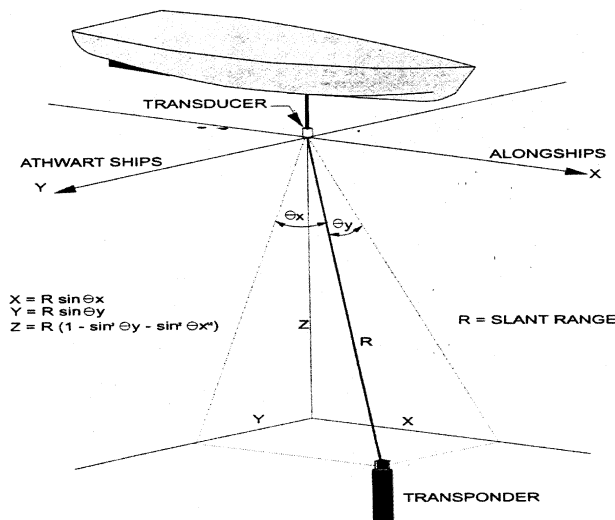


Рис.4. Схема работы гидроакустической системы SSBL для определения относительного положения ССП.

В гидроакустической системе SSBL (рис.4) на основе измерения расстояния и направления от передатчика, установленного на судне

(Transducer), до приемника (Transponder), установленного на морском дне с известными координатами, рассчитывается трехмерное положение передатчика (Transducer) относительно приемника (Transponder). Судовая система измеряет время прохождения звука от передатчика (Transducer) до приемника (Transponder) и обратно и рассчитывает расстояние R между ними, исходя из скорости распространения звука в воде. Кроме того, измеряются углы отклонения направления от передатчика (Transducer) до приемника (Transponder) относительно продольной x и поперечной y осей судна. На этой основе рассчитываются прямоугольные координаты передатчика относительно приемника (Transducer) – $x = R \cdot \sin \Theta_x$ и $y = R \cdot \sin \Theta_y$.

Для связи географических координат передатчика с прямоугольными координатами приемника рассмотрим схему на рис.5.

Точка O – место расположения приемника с известными координатами φ_o и λ_o ; точка A – проекция места нахождения судна на горизонтальную плоскость, на которой находится приемник, координаты которой необходимо определить; R – измеренное расстояние; Θ_x и Θ_y – измеренные углы; $AB = x$ и $OB = y$ – прямоугольные координаты точки O относительно диаметральной плоскости судна; $AO = \rho$ – расстояние между точкой O и точкой A ; ПУ – путевой угол судна; N и E – координатные оси норда и оста.

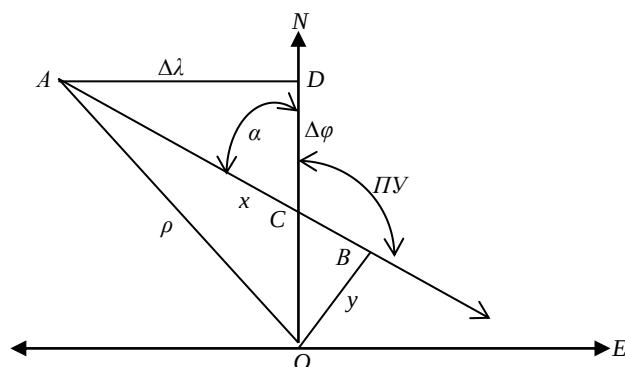


Рис.5. Схема гидроакустической системы SSBL для определения координат судна.

Для определения координат точки A воспользуемся линейно-угловой за-
сечкой. Для этого: 1) с помощью системы SSBL измеряются расстояние R (если расстояние измерено в метрах, то метры переводятся в морские мили делением на 1852) и углы Θ_x и Θ_y (рис. 4); 2) рассчитываются $x = R \cdot \sin \Theta_x$ и $y = R \cdot \sin \Theta_y$; 3) из ΔAOB определяется ρ ; 4) из ΔOBC и ADC определяется $\Delta \varphi = OC + CD$ с учетом угла $\alpha = 180^\circ - \text{ПУ}$; 5) из ΔAOC рассчитывается $\Delta \lambda$ (рис.5); 6) искомые координаты, как $\varphi_A = \varphi_o \pm \Delta \varphi$ и $\lambda_A = \lambda_o \pm \Delta \lambda$, которые в данном случае в конечном виде после анализа на знаки равны:

$$\varphi_A = \varphi_o + R[\sin \Theta_x + \sin \Theta_y (\sec \alpha - \operatorname{ctg} \alpha \cdot \cos \alpha)]; \quad (16)$$

$$\lambda_A = \lambda_o - R \sqrt{\sin^2 \Theta_x + \sin^2 \Theta_y - [\sin \Theta_x + \sin \Theta_y (\sec \alpha - \operatorname{ctg} \alpha \cdot \cos \alpha)]^2}. \quad (17)$$

Выводы и перспектива работы по данному направлению

В статье разработаны методики по определению оценки и контролю надежности подсистем СДП, а также по приведению показателей основных и резервных навигационных систем определения положения и места в СДП – абсолютных и относительных к одинаковым единицам измерения. Эти методики могут послужить основой для повышения надежности работы ССДП. Для этого необходимо дальнейшее научное обоснование и разработка:

- методики по определению интенсивности отказов элементов подсистем СДП;
- методики определения оценки и контроля надежности работы ССДП в случае использования избыточности в подсистемах СДП с нагруженным и облегченным резервированием ее элементов;
- дополнений к компьютерным программам контроля СДП, позволяющих решать системы уравнений, реализующих результаты предлагаемых решений.

ЛИТЕРАТУРА

1. International Guidelines for the Safe Operation of Dynamically Positioned Offshore Supply Vessels. М 182. – London: The International Marine Contractors Association (IMCA), 2006. – 182 p.
2. Rules for Classification of Ships. Dynamic Positioning Systems. Part 6 Chapter 7. – Oslo: Høvik, Det Norske Veritas AS, 2012. – 40 p.
3. Гнеденко Б. В. Математические методы в теории надежности / Гнеденко Б.В., Беляев Ю. К., Соловьев А. Д. - М.: Наука, 1965. - 524 с.
4. Голинкевич Т.А. Прикладная теория надежности / Голинкевич Т.А. – М.: Высш. шк., 1985. – 168 с.
5. Depner J.S. The Universal Transverse Mercator (UTM) Grid System and Topographic Maps. An Introductory Guide for Scientists & Engineers / Joe S. Depner. – 2011. - <http://www.depnerphoto.com> – 80 p.
6. Вентцель Е.С. Теория случайных процессов и ее инженерное приложение / Вентцель Е.С., Овчаров Л.А.. – М.: Высшая школа, 2000. – 383 с.
7. Лопатников Л.И. Экономико-математический словарь. Словарь современной экономической науки / Лопатников Л.И. – М.: Дело, 2003. – 520 с.
8. СП-104-97 «Инженерно-геодезические изыскания для строительства. Часть III. «Инженерно-гидрографические работы при инженерных изысканиях для строительства» / Госстрой России. - М.: Производственный и научно-исследовательский институт по инженерным изысканиям в строительстве (ФГУП «ПНИИС») Госстроя России. - 2004. – 196 с.