

## СОЗДАНИЕ РЯДА СИСТЕМ ОРИЕНТИРОВАНИЯ ДЛЯ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ \*

Д.А. Буров<sup>1</sup>, Е.И. Верзунов<sup>2</sup>

ОАО «ВНИИ «Сигнал», г. Ковров, Россия, e-mail: [mail@vniisignal.ru](mailto:mail@vniisignal.ru)

### Аннотация

**Ключевые слова:** робототехнические комплексы, системы ориентации, автокомпенсация погрешностей, снижение массы, габаритов и стоимости

*Рассматриваются требования к системам ориентирования (СО) робототехнических комплексов различных весовых категорий: легчайшей (носимые), лёгкой (переносные), средней и тяжёлой (мобильные). Решается задача по снижению массы, габаритов и стоимости СО для мобильных роботов при обеспечении заданной точности. Предлагаемые схемы построения СО позволяют, по сравнению с БИНС, за счёт поворотов ЧЭ использовать потенциальные возможности ЧЭ по точности более оптимальным образом. Схемы построения СО реализуются таким образом, что курсовой гироскоп в раме карданова подвеса в горизонтальном положении обеспечивает измерение азимута, а в вертикальном – хранение направления, а пара гироскопов пониженной точности и акселерометров в схеме аналитической гировертикали обеспечивает выработку углов наклонов и приборную реализацию плоскости горизонта. Приведены описание принципов работы и состав различных вариантов СО. Новым является рассмотрение применения вариации Аллана для оптимизации точности и времени гироскопирования с автокомпенсацией погрешностей ЧЭ при использовании дискретных поворотов в предлагаемых схемах построения СО.*

### Введение

В настоящее время интенсивно проводятся работы по созданию мобильных роботов, робототехнических комплексов различного назначения (минирование-разминирование местности, эвакуация раненых и пострадавших, проведение спасательных операций, разведка местности, инспекция помещений и др.).

Управление робототехническими комплексами, осуществляется с помощью установленной на борту аппаратуры топопривязки и ориентирования, включающей СО различной точности.

Основные усилия разработчиков СО сосредоточены на создании бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС). Преимущества БИНС по сравнению с платформенными навигационными системами состоят в отсутствии сложной электромеханической системы - гиросtabilизированной платформы, уменьшении габаритов, массы и энергопотребления, меньшей стоимости и более простом комплексировании с системами навигации, работающими на других принципах, в частности спутниковыми навигационными системами.

Вместе с тем, БИНС предъявляют более высокие требования к чувствительным элементам - гироскопам и акселерометрам, в части точности и большего диапазона измеряемых параметров, более высокие требования к вычислительной технике.

В соответствии с типом носителя (человек, буксируемые тележки, прицепы и т.п., колёсные и гусеничные (в перспективе шагающие) наземные подвижные объекты) носимые, переносные, буксируемые, подвижные робототехнические комплексы разделяются на различные весовые категории. Вес робототехнического комплекса в значительной мере определяет весогабаритные характеристики применяемой аппаратуры и, как следствие, устанавливает определённые рамки на уровень точности бортовых СО. Указанное связано с тем, что в современных разработках СО наблюдается достаточно чёткая зависимость: чем больше размеры, масса и стоимость СО, тем выше её точность.

С другой стороны характеристики СО для различных робототехнических комплексов задаются исходя из необходимой точности решения навигации и времени автономной работы при выполнении задач, которые в свою очередь зависят от условий эксплуатации роботов: внутри помещений, в городе, в лесу, в горах, на открытой местности и др.

В результате для комплектования наземных мобильных роботов актуальна задача разработки ряда СО разной точности, массы, габаритов и стоимости, оптимизированных по перечисленным характеристикам.

---

<sup>1</sup> Начальник сектора.

<sup>2</sup> Ведущий инженер.

## 1. Технические характеристики СО мобильных роботов

Анализ создания мобильных роботов различного назначения позволяет выделить в качестве потребителей СО робототехнические комплексы различных категорий:

- 1) робототехнический комплекс легчайшей весовой категории;
- 2) робототехнический комплекс лёгкой весовой категории;
- 3) разведывательный робототехнический комплекс лёгкой весовой категории;
- 4) многофункциональный робототехнический комплекс средней весовой категории.
- 5) пункт дистанционного управления робототехнических комплексов.

С точки зрения функциональных требований СО для указанных робототехнических комплексов должны обеспечивать:

- начальное ориентирование продольной оси робота;
- хранение угла начального ориентирования на стоянке и в движении;
- определение продольного и поперечного углов наклона.

Основные требования к СО в соответствии с тактико-техническими требованиями, предъявляемыми к аппаратуре и устройствам робототехнических комплексов различной весовой категории, представлены в таблице.

**Основные технические характеристики вариантов систем ориентирования мобильных роботов различных весовых категорий**

Варианты СО  Характеристика	Робото-технического комплекса легчайшей весовой категории	Робототехнического комплекса лёгкой весовой категории	Разведывательного робототехнического комплекса лёгкой весовой категории	Многофункционального робототехнического комплекса средней весовой категории	Пункта дистанционного управления робототехнических комплексов
	1	2	3	4	5
Погрешность начального ориентирования продольной оси робота ( $3\sigma$ ), °	0.60	0.48	0.36	0.24	0.48
Время начального ориентирования, мин	1	5	5	5	6
Хранение угла азимута продольной оси робота за время движения до 0,5 ч ( $\sigma$ ), °	1.2	0.60	0.36	0.15	0.18
Погрешность определения углов продольного и поперечного наклонов ( $\sigma$ ), °	0.60	0.36	0.24	0.12	0.12
Масса <sup>1</sup> , кг	0.4	1.5÷2.0	5.0	10.0	10.0

Примечание: <sup>1</sup> Для аппаратуры топопривязки и ориентирования в целом.

## 2. Предложения по построению СО перспективных робототехнических комплексов

Анализ данных табл. позволяют наметить предварительный приборный состав СО для роботов различных весовых категорий, оптимальный по типу применяемых чувствительных элементов:

для СО робототехнического комплекса легчайшей весовой категории – микромеханический гироскоп (ММГ) и микромеханический акселерометр (ММА) (без реализации режима самоориентирования);

для СО робототехнического комплекса лёгкой весовой категории – малогабаритный волоконно-оптический гироскоп (ВОГ), ММГ, малогабаритный твердотельный волновой гироскоп (ТВГ), ММА;

для СО разведывательного робототехнического комплекса лёгкой весовой категории – ВОГ, ТВГ, маятниковый акселерометр (МА), ММА;

для СО многофункционального робототехнического комплекса средней весовой категории – кольцевой лазерный гироскоп (КЛГ), ВОГ, МА;

для СО пункта дистанционного управления робототехнических комплексов – ВОГ, ТВГ, МА, ММА.

Формализовать процедуру синтеза новых структур СО для робототехнических комплексов можно используя метод базовых гироскопических элементов [1].

На основе декомпозиции существующих структур гироскопических приборов и систем ориентирования в качестве таких элементов для классических платформенных гиросистем, гироскопов, гироскопов и т.д. на классических гиросистемах, ДНГ выделены: курсовой гироскоп в вертикально ориентированной кардановой раме, курсовой гироскоп в горизонтально ориентированной кардановой раме, вертикальный гироскоп в вертикально ориентированной кардановой раме, вертикальный гироскоп в горизонтальном двухосном кардановом подвесе. Для базовых гироскопических элементов определяются характерные алгоритмы их работы и управления. С использованием базовых гироскопических элементов в [1] предложены новые структуры гироскопических приборов на базе ДНГ с заданными свойствами и характеристиками.

При переходе к построению элементов СО, построенных по принципу БИНС, указанные базовые гироскопические элементы используются аналогичным образом за исключением того, что при управлении базовыми гироскопическими элементами не применяется непрерывная индикаторная стабилизация рам карданова подвеса, а осуществляется дискретное изменение расположения ЧЭ относительно корпуса устройства. Указанное позволяет упростить исполнительные электромеханические элементы, при этом по сравнению с БИНС, использовать потенциальные возможности точности ЧЭ по точности более оптимальным образом, а именно: осуществлять автокомпенсацию погрешностей ЧЭ, ориентировать ЧЭ оптимальным образом при работе в заданном режиме (гироскопирование, хранение направления), сократить количество высокоточных ЧЭ (вместо трёх высокоточных гироскопов появляется возможность применить один высокоточный и два низкоточных гироскопа). При этом курсовой гироскоп в раме карданова подвеса может обеспечивать как измерение азимута, так и хранение направления, а пара гироскопов пониженной точности и акселерометров в схеме аналитической гироскопической ориентации обеспечит выработку углов наклонов и приборную реализацию плоскости горизонта.

Результаты синтеза базовых структур СО по вариантам для робототехнических комплексов различных весовых категорий представлены на рис. 1 и 2.

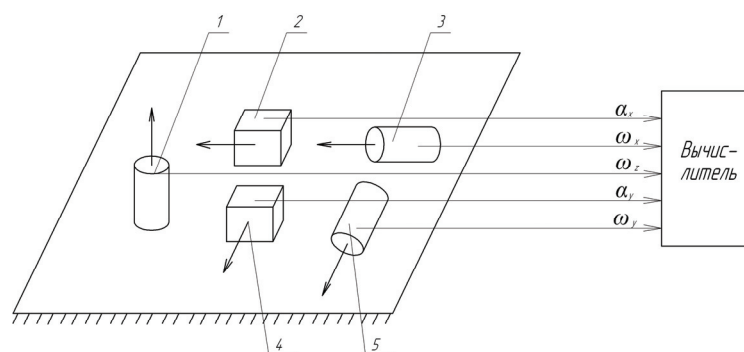


Рис. 1. Простейшая конфигурация построения СО без режима самоориентирования для вариантов 1, 2 табл.: 1 – ММГ, малогабаритный ВОГ, ТВГ; 2, 4 – ММА; 3, 5 – ММГ, малогабаритный ТВГ

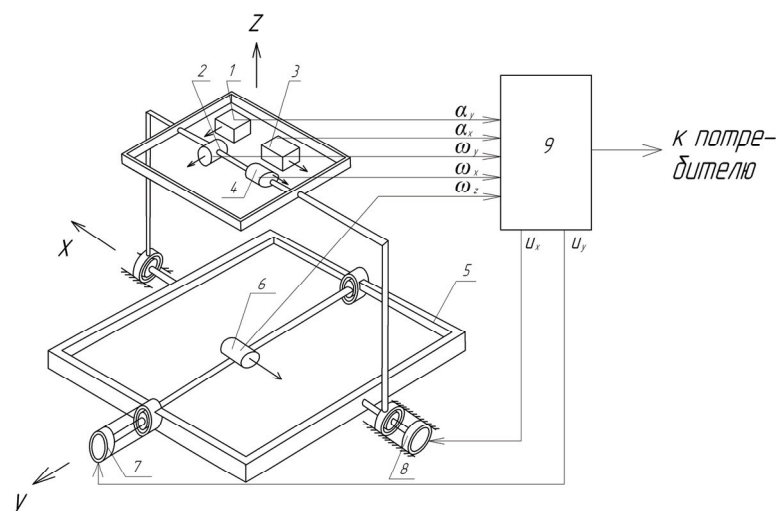


Рис. 2. Конфигурация построения СО с двумя поворачивающимися рамами подвеса с режимом самоориентирования с одним ориентируемым гироскопом для вариантов 3, 4, 5 табл.

Функционирование предлагаемых структур СО осуществляется с использованием надёжно отработанных алгоритмов БИНС [2], на описании которых не будем останавливаться подробно.

Схема, представленная на рис. 1, предполагает простейшую конфигурацию построения СО без режима самоориентирования. Указанное связано с тем, что реализация режима самоориентирования для легчайшей и лёгкой весовых категорий (носимая, переносная аппаратура) исходя из уровня параметров существующих ЧЭ представляется нецелесообразным, т. к. ведёт к существенному увеличению стоимости, габаритов и веса СО данного класса. Для данных категорий робототехнических комплексов представляется целесообразным организация единственного режима – режима хранения направления с определением углов наклонов, а начальное ориентирование осуществлять от отдельного устройства передачей азимутального направления.

Схема, представленная на рис. 2, предполагает построение СО с двумя поворачивающимися рамами подвеса с режимом самоориентирования с одним ориентируемым гироскопом. На оси внутренней рамы закреплён высокоточный датчик угловой скорости (ДУС) 6. ДУС 6 установлен таким образом, что его ось чувствительности перпендикулярна оси внутренней рамы. На оси внутренней рамы установлено исполнительное устройство 7. Ротор исполнительного устройства 7 связан с внутренней рамой, а статор закреплён на наружной раме 5. Наружная рама 5 своими осями установлена в корпусе устройства. На оси наружной рамы 5 подвеса установлено второе исполнительное устройство 8. С осью наружной рамы 5 подвеса связан ротор второго исполнительного устройства 8, статор которого закреплён в корпусе СО. В результате высокоточный ДУС 6 может поворачиваться в диапазоне углов  $\pm 90^\circ$  относительно продольной и поперечной осей прибора относительно направления, нормального к основанию прибора. В корпусе установлены два акселерометра 1 и 3, а так же два низкоточных ДУС 2 и 4, таким образом, что оси чувствительности низкоточных ДУСов и акселерометров находятся в плоскости основания, оси чувствительности одного низкоточного ДУС и одного акселерометра расположены по направлению оси наружной рамы подвеса, а оси чувствительности второго низкоточного ДУС и второго акселерометра в перпендикулярном направлении. Сигналы угловых скоростей  $\omega_x, \omega_y, \omega_z$  от ДУСов и ускорений  $a_x, a_y$  от акселерометров поступают в бортовой вычислитель 9. Сигналы управления  $U_x, U_y$  из бортового вычислителя 9 поступают на исполнительные устройства 7, 8 подвеса. Благодаря предложенной кинематической схеме, набору чувствительных, микропроцессорного и силовых исполнительных элементов (электромагнитов) обеспечиваются:

- гироскопирование с помощью высокоточного датчика угловой скорости с компенсацией систематической составляющей ошибки высокоточного датчика угловой скорости (ось чувствительности датчика ориентируется в плоскости основания прибора в четырех различных положениях);
- компенсация погрешности самоориентирования, обусловленной колебаниями объекта от ветровых нагрузок, хождения экипажа и др. по сигналам канала построения вертикали;
- режим хранения курсового угла с помощью высокоточного датчика угловой скорости при движении объекта (ось чувствительности датчика ориентируется по вертикали места (перпендикулярно основанию объекта));
- определение углов наклона объекта на стоянке и при движении объекта.

При этом структура СО по схеме рис.2 позволяет снизить массогабаритные характеристики, а также стоимость по отношению к БИНС с аналогичными точностными характеристиками.

### **3. Применение вариации Аллана для оптимизации точности гироскопирования при автокомпенсации погрешностей с использованием дискретных поворотов ЧЭ**

Для повышения точности гироскопирования в настоящее время применяются различные методы компенсации погрешностей, а также методы оптимизации проведения измерений в составе СО.

Указанные методы обладают различной эффективностью. Для современных СО, построенных по схеме БИНС, наиболее реализуемы методы повышения точности с использованием ЭВМ и микроконтроллеров, а именно, алгоритмическая компенсация погрешностей и автокомпенсация погрешностей при аналитических способах получения параметров ориентирования.

Метод автокомпенсации предусматривает повороты измерительных осей ЧЭ в пространстве. Для структуры СО с поворачивающимися рамами (рис. 2) повороты ЧЭ являются дискретными и фиксированными.

На точность гироскопирования влияют случайный шум, случайный уход (случайное блуждание дрейфа), тренд скорости дрейфа, изменение тренда угловой скорости дрейфа, а также изменение систематической составляющей скорости дрейфа от запуска к запуску. Метод автокомпенсации позволяет исключить влияние изменения систематической составляющей скорости дрейфа гироскопа от запуска к запуску, а также минимизировать влияние тренда скорости дрейфа и его изменения (ускорения тренда).

Степень компенсации влияния тренда скорости дрейфа и его изменения определяется величинами как самого тренда и его изменения с одной стороны, так и промежутками времени между соседними из-

мерениями с другой. На рис. 3 показана дискретная автокомпенсация графически в процесс гироскопирования в 2 и 4 положениях для линейной модели тренда скорости дрейфа. Погрешность автокомпенсации  $\Delta\omega$  тем больше, чем дальше отстоят друг от друга (время  $t_{авт}$ ) середины интервалов измерений, соответствующие средним результатам измерений и чем сильнее наклон линии тренда.

Влияние случайного шума и случайного ухода связано с временем усреднения при проведении измерений. Чем больше время усреднения, тем меньше влияние указанных величин. Таким образом, в рассмотренной структуре СО с разворотами ЧЭ можно провести оптимизацию времени измерения в каждом положении ЧЭ  $t_{изм}$  (или что то же самое количества  $n$  измерений при заданном времени гироскопирования) с целью получения минимальной ошибки определения азимута при применении автокомпенсации.

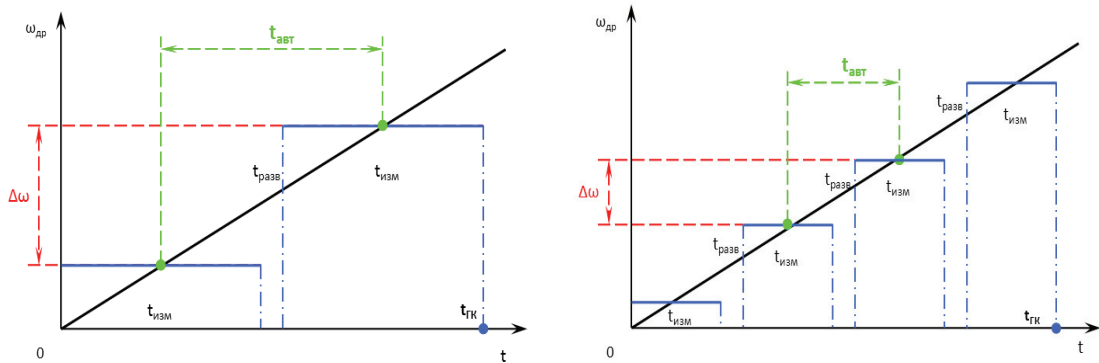


Рис. 3. Ошибка автокомпенсации  $\Delta\omega$  при гироскопировании в 2 и 4 положениях

Исходными параметрами для решения задачи являются параметры структуры ухода гироскопического ЧЭ, определяемые параметрами аппроксимирующей кривой вариации Аллана [3, 4]. При анализе вариации Аллана рассматриваются:  $Q$  – коэффициент шума квантования (случайный шум),  $N$  – коэффициент случайного углового ухода (случайное блуждание дрейфа),  $B$  – коэффициент нестабильности смещения нуля,  $K$  – коэффициент случайного ухода угловой скорости (изменение тренда нулевого сигнала),  $R$  – коэффициент линейного изменения угловой скорости (тренд нулевого сигнала). Исходными данными для процесса гироскопирования являются:  $t_{ГК}$  – заданное время гироскопирования,  $t_{разв}$  – время разворота ЧЭ в положение для измерения.

При проведении анализа приняты следующие допущения: 1 влияние осреднения учитывается за суммарное время измерения во всех положениях, процесс гироскопирования приводится к однопозиционному путём приведения всех измерений к начальному положению и «сшивки» результатов, откорректированных на величину постоянной составляющей измерений в каждом положении в единую последовательность; 2 составляющая  $B$  не учитывается в виду того, что её влияние в процессе автокомпенсации не изменяется; 3 считается, что влияние изменения систематической составляющей скорости дрейфа гироскопа от запуска к запуску в результате автокомпенсации исключается полностью.

С учётом аппроксимирующего выражения для вариации Аллана влияние параметров структуры шумов на ошибку измерения при гироскопировании определяется следующим выражением:

$$\Delta\omega(n) = \sqrt{R^2 \frac{(t_{ГК} + t_{разв})^2}{2n^2} + K^2 \frac{t_{ГК} + t_{разв}}{3n} + N^2 \frac{1}{t_{ГК} - (n-1)t_{разв}} + Q^2 \frac{3}{(t_{ГК} - (n-1)t_{разв})^2}}$$

или 
$$\Delta\omega(t_{изм}) = \sqrt{R^2 \frac{(t_{изм} + t_{разв})^2}{2} + K^2 \frac{t_{изм} + t_{разв}}{3} + N^2 \frac{1}{n \cdot t_{изм}} + Q^2 \frac{3}{(n \cdot t_{изм})^2}} \quad (1)$$

С использованием выражений (1) может быть проведена оптимизация с целью уменьшения ошибки гироскопа при автокомпенсации  $\Delta\omega$ , а, следовательно, повышения точности определения азимута в зависимости от времени одного измерения  $t_{изм}$  (или количества измерений  $n$ ) при заданных времени гироскопирования  $t_{ГК}$  и времени разворота  $t_{разв}$  на заданный угол и времени измерения при заданной ошибке. В результате с учётом конкретной структуры шумов гироскопа может быть получен процесс определения азимута, оптимальный по времени и точности.

На рис. 4 представлена типичная вариация Аллана, полученная для прибора ОИУС-1000, изготовленного НПК «Оптолинк» для ОАО «Сигнал», при тестировании в климатической камере в диапазоне температур -30...+60°C при максимальном температурном градиенте 20°C/час.

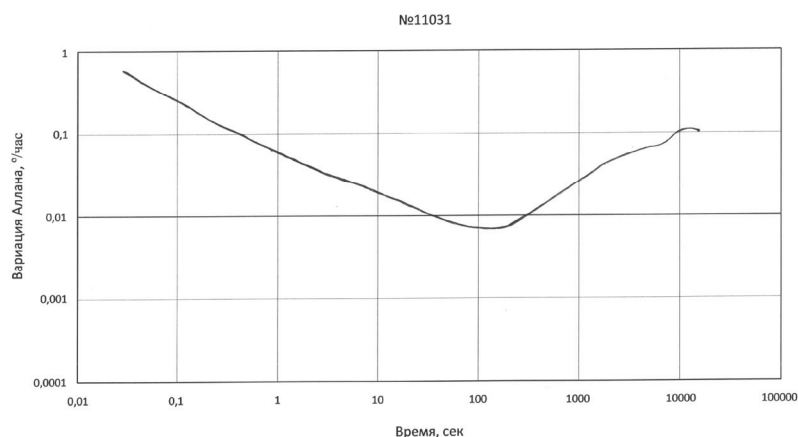


Рис. 4. Вариация Аллана ОИУС-1000 при температурном градиенте 20°C/ч

При температурном градиенте 20°C/ч для трёх приборов ОИУС-1000 получены следующие оценки параметров вариации Аллана:

Параметр вариации Аллана	ОИУС-1000 №11030	ОИУС-1000 №11031	ОИУС-1000 №12003
$N_s, \text{°}/\sqrt{\text{ч}}$	0.00105	0.00091	0.00091
$B_s, \text{°}/\text{ч}$	0.0070	0.0070	0.0070
$R_s, \text{°}/\text{ч}^2$	0.127	0.127	0.153

Процесс оптимизации рассмотрен на примере простейшего алгоритма автокомпенсации при гироскопировании, при котором измерения гироскопом проводятся в положениях, отстоящих друг от друга на 180°.

На рис. 5 представлен график зависимости  $\frac{d}{dn}(\Delta\omega(n))$  для прибора ОИУС-1000 для полученных параметров вариации Аллана  $N=0.001\text{°}/\sqrt{\text{ч}}$  и  $R=0.127\text{°}/\text{ч}^2$  с параметрами автокомпенсации  $t_{разв}=2$  с и гироскопирования  $t_{ГК}=5$  мин в соответствии с данными табл. для разведывательного робототехнического комплекса лёгкой весовой категории.

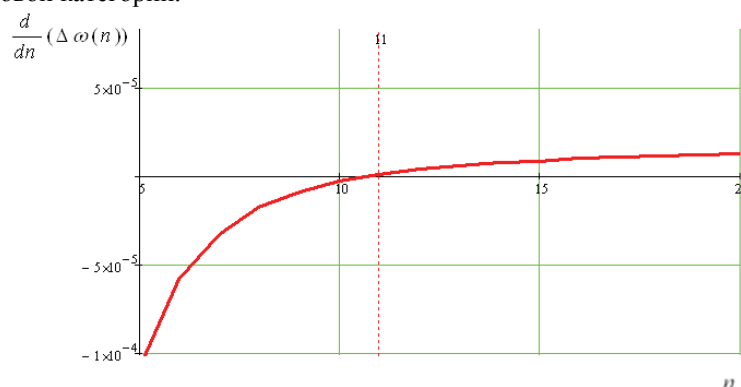


Рис. 5. График оптимизации погрешности автокомпенсации по количеству измерений  $n$  для прибора ОИУС-1000

Пересечение с осью абсцисс достигается при  $n_{opt} = 11$ . Таким образом, минимальная ошибка измерения угловой скорости от ошибок, зависящих от времени усреднения сигнала ОИУС-1000, составляет  $3.651 \cdot 10^{-3} \text{°}/\text{ч}$  ( $1\sigma$ ) (рис. 6) при условии выполнения за 5 мин 10 последовательных поворотов ЧЭ на 180° с проведением измерений в 11 положениях. С учётом полученной максимальной нестабильности смеще-

ния нуля  $\Delta\omega_B = B\sqrt{\frac{2}{\pi}\ln 2} = 4.650 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ/\text{ч}$  (1 $\sigma$ ) на базе прибора ОИУС-1000 с применением схемы рис. 2

принципиально возможно получение точности гирокомпасирования на уровне 0.07°·сек (широты) (3 $\sigma$ ) в диапазоне температур. Без применения автокомпенсации (для БИНС) ошибка в измерении азимута в диапазоне температур в соответствии с данными испытаний приборов ОИУС-1000 за 1 ч измерений может достигать величины 1.03°·сек (широты) (3 $\sigma$ ).

Оптимизация по вариации Аллана может быть применена к любому из известных способов автокомпенсации, использующих 2, отличающихся на 180°, 3, 4, отличающихся на 90°, и более положений оси чувствительности гироскопа. При этом с использованием предложенного метода оценки влияния параметров вариации Аллана в СО реализуется режим гирокомпасирования, оптимальный по времени и точности.

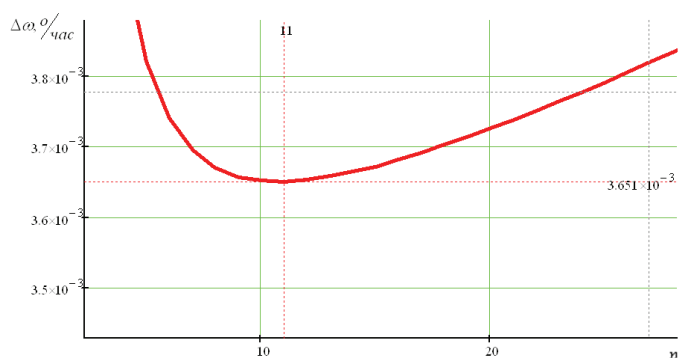


Рис. 6. Ошибка измерения угловой скорости при автокомпенсации для прибора ОИУС-1000 в зависимости от количества измерений  $n$

## Выводы

В ходе работы проведён анализ номенклатуры и уровня тактико-технических характеристик ЧЭ для СО мобильных роботов. Выполнен анализ перспективных направлений и тенденций построения и развития автономных СО в России и за рубежом.

Проведены исследования по определению состава, схем и принципов построения (вариантов построения) систем ориентирования для:

- 1) робототехнического комплекса легчайшей весовой категории;
- 2) робототехнического комплекса лёгкой весовой категории;
- 3) разведывательного робототехнического комплекса лёгкой весовой категории;
- 4) многофункционального робототехнического комплекса средней весовой категории;
- 5) пункта дистанционного управления робототехнических комплексов.

Получены результаты, подтверждающие реализуемость технических характеристик и применённых решений. Проведена оценка стоимостных, массогабаритных характеристик предлагаемых систем ориентирования.

Предложено применение вариации Аллана для оптимизации точности и времени гирокомпасирования с автокомпенсацией погрешностей в схемах построения СО с поворотами ЧЭ.

## Литература

1. Буров, Д.А. Разработка гаммы гироскопических приборов для наземных подвижных объектов с использованием базовых гироскопических структурных элементов / Н.Н. Кокошкин, Е.И. Верзунов, Д.А. Буров, В.Н. Феофанов // XV Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. – СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электрон», 2008. – С.160-162.
2. Матвеев, В.В. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем / В.В. Матвеев, В.Я. Распопов / Под общ. ред. д.т.н. В.Я. Распопова. – СПб.: ГИЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электрон», 2009. – 280 с.
3. IEEE Std 952-1997. IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Single-Axis Interferometric Fiber Optic Gyros.
4. Сиряя, Т.Н. Вариация Аллана как оценка погрешности измерения // Гироскопия и навигация. – 2010. - № 2. – С.29-35.