

# Волоконно-оптические гироскопы и системы на их основе

## Часть 1

Ю. Березина<sup>1</sup>

УДК 528.526.6 | ВАК 2.2.2

В настоящее время на российском рынке спрос на волоконно-оптические гироскопы превышает предложение, что влечет за собой увеличение сроков поставки и производства конечной продукции. Закрывать потребности заказчиков в точных волоконно-оптических гироскопах способны китайские производители инерциальных датчиков. Компания «ИНЕЛСО» поставляет инерциальные датчики BLITZ Sensor, построенные на основе передовых технологий и предназначенные для применения в геофизике, авиационном и космическом приборостроении, робототехнике, железнодорожном транспорте, автомобилестроении и других областях. В статье представлен обзор устройств и отраслей, в которых применяются волоконно-оптические гироскопы и системы на их основе.

**П**ринцип работы волоконно-оптических гироскопов (ВОГ) основан на эффекте Саньяка, который заключается в возникновении разности фаз при прохождении светового луча через замкнутый волоконно-оптический контур. Возникающая разность фаз пропорциональна изменению угловой скорости, с которой вращается волоконно-оптический контур (а, следовательно, гироскоп и все тело). Гироскопы, изготовленные по такой технологии, обеспечивают высокую точность измерений и надежность.

Благодаря многообразию волоконно-оптических гироскопов и модулей на их основе возможно решение широкого спектра задач.

### СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПУТЕЙ

Контроль параметров положения и профиля (геометрии) рельсовых нитей является важной задачей для своевременного выявления деформаций железнодорожных путей как на этапе строительства, так и в ходе последующей эксплуатации [1]. Этот контроль осуществляется с использованием автоматизированных путеизмерительных комплексов (тележек) с последующей выправкой машинным путем (при смещении рельсовых нитей относительно расчетного положения).

Методы контроля можно подразделить на четыре группы в зависимости от используемого способа измерений [2]:

- на основе использования механических баз;
- на основе глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС);
- на основе инерциальных навигационных систем (ИНС);
- на основе использования оптико-электронных методов и опорной (реперной) сети.

В данной статье нас интересуют инерциальные навигационные системы, поэтому рассмотрим подробнее третий метод. Он заключается в измерении углов ориен-

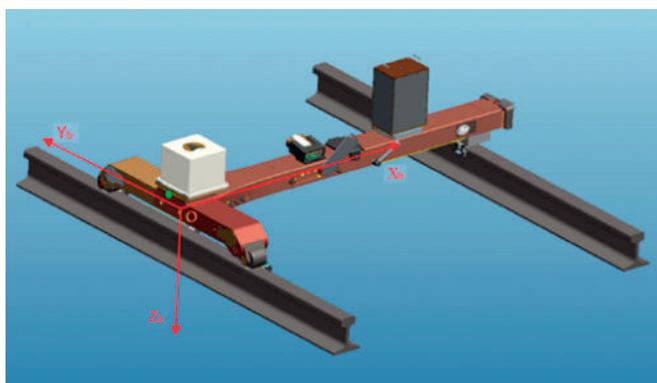
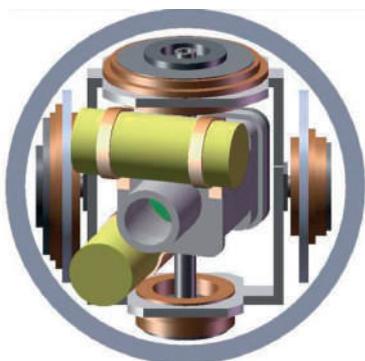


Рис. 1. 3D-модель измерительного комплекса для мониторинга геометрии железнодорожных нитей [3]

<sup>1</sup> Компания «ИНЕЛСО», технический специалист, sales@inelso.ru.



**Рис. 2.** Двухосевой гиросtabilизатор на основе ВОГ [6]

тации вектора движения тележки (крен, курс, тангаж), после чего при помощи навигационного алгоритма определяется траектория пути. В данную систему входят ИНС и дополнительные датчики, среди которых могут быть одометры, тахеометры, лидары и др. В некоторых измерительных комплексах используются ИНС, и дополнительные датчики, и приемная аппаратура спутниковой навигации (ПА СНС). На рис. 1 приведена 3D-модель измерительного комплекса, в состав которого входят ИНС (слева), видеокамера (в центре), а также блок дополнительных датчиков и ПА СНС (справа).

В подобных приложениях используют бесплатформенные инерциальные навигационные системы (БИНС) на основе ВОГ или лазерных гироскопов, поскольку МЭМС-гироскопы не смогут удовлетворить требованиям по точности в данном применении.

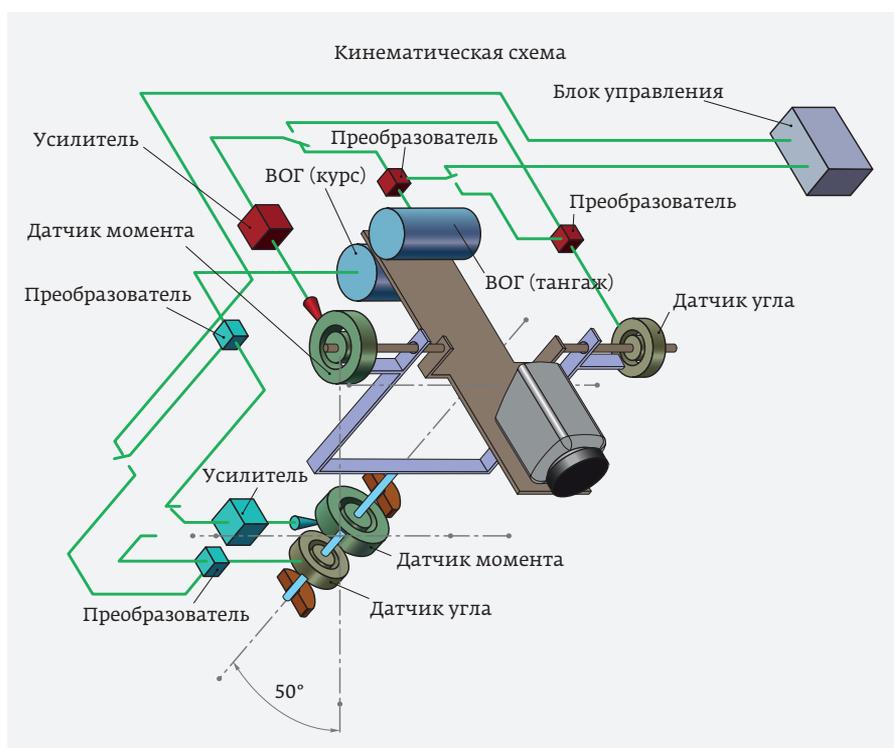
Часто измерительные комплексы объединяют с выправочными машинами, что позволяет ускорить процесс мониторинга и выправки железнодорожных нитей и сократить время простоя путей. Подобные автоматизированные тележки могут применяться не только для контроля геометрии железнодорожных нитей, но и, например, для диагностирования состояния крановых путей и других подобных конструкций [4]. Важно отметить, что подобные тележки и выправочные машины применяют только для определения и коррекции геометрии рельсовой колеи (положения и отклонения, траектории, искривления и др.), а для определения состояния скрытых дефектов (трещин, сколов и др.) используются вагоны-дефектоскопы, использующие для измерений ультразвуковые и магнитные искатели.

Для использования в системах мониторинга геометрии железнодорожных путей подойдут следующие продукты BLITZ Sensor:

- BS-FU26/29/32/33/34/50 – волоконно-оптические гироскопы, имеющие исполнения с разными диапазонами измерений и в различных корпусах;
- BS-FN600 – инерциальная навигационная система, способная принимать сигнал от внешнего приемника спутникового сигнала;
- BS-FN500 – инерциальная навигационная система со встроенным приемником спутниковой навигации.

### СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ОПТИЧЕСКИХ И ДРУГИХ СИСТЕМ НА ПОДВИЖНОМ ОБЪЕКТЕ

Во многих сферах существует задача стабилизации оптических и других систем на подвижном объекте, например в квадрокоптерах, используемых для видеосъемки массовых мероприятий с воздуха. Для устранения побочных эффектов от тряски, возникающей во время полета, применяются гиросtabilизаторы, которые бывают непосредственными, силовыми (гирорама) и индикаторными [5]. В непосредственных гиросtabilизаторах для компенсации возмущающих воздействий используются непосредственно гироскопические свойства трехстепенного гироскопа. Как правило, подобные устройства отличаются большими размерами



**Рис. 3.** Схема двухосевого гиросtabilизатора для квадрокоптера [7]



**Рис. 4.** Профессиональный квадрокоптер для аэровидеосъемки с кардановым подвесом [8]



**Рис. 5.** Гиросtabilизатор 2ГСП, установленный на вертолете [7]

и применяются в крупных системах (например, в устройстве морских судов). В силовых гиросtabilизаторах, помимо собственно блока датчиков, присутствует также электромеханический (как правило, приводной) блок для преодоления внешних воздействий. Применяются для стабилизации отдельных приборов и устройств. В индикаторных гиросtabilизаторах гироскопы выполняют роль чувствительного элемента, определяющего положения объекта, а стабилизация выполняется уже другими системами. Собственно, в системах стабилизации видеоаппаратуры на квадрокоптерах наиболее широкое распространение получили именно индикаторные гиросtabilизаторы.

Для гиросtabilизаторов могут применяться гироскопы, изготовленные по различным технологиям, поскольку у каждого вида датчиков есть свои слабые и сильные стороны. Так, если важнее изготовить бюджетное и/или небольшое изделие, допустимо использовать МЭМС-гироскопы, отличающиеся относительно малой ценой, но меньшей точностью. Волоконно-оптические гироскопы

позволяют существенно повысить точность стабилизации, но при этом повышают стоимость системы и увеличивают ее размеры. К основным преимуществам гиросtabilизаторов на основе ВОГ относятся:

- малое время готовности;
- малая потребляемая мощность;
- высокая точность;
- длительный срок эксплуатации.

На рис. 2 представлена 3D-модель двухосевого индикаторного гиросtabilизатора на основе ВОГ (гироскопы показаны желтым цветом).

Гиросtabilизаторы для оптических и других систем на подвижном объекте должны быть компактными и легкими для сохранения пространства для перемещения полезной нагрузки (например, видеокамеры). На рис. 3 показана схема устройства двухосевого гиросtabilизатора для квадрокоптера. Подобные системы с кардановым подвесом применяются в профессиональных квадрокоптерах (рис. 4).

Помимо квадрокоптеров, видео- и аудиоаппаратура часто устанавливается на операторских кранах, канатных дорогах и тележках для съемок динамичных сцен. В России в 20 веке в этих сферах особенно широкое применение получили гиросtabilизаторы серии ГСП, в частности 2ГСП и 3ГСП, разработанные в МГТУ им. Н.Э. Баумана. Они представляют собой трехосевую индикаторную гиросtabilизаторную платформу, закрепленную в кардановом подвесе [9]. Гиросtabilизатор 2ГСП предназначен для использования на транспортных средствах (автомобиль, вертолет, катер), а 3ГСП подходит для установки не только на средства, но и на вспомогательное кинооборудование. На рис. 5 и 6 показаны гиросtabilизаторы 2ГСП и 3ГСП, используемые при киносъемке.

Как отмечает в своей статье В.А. Кулешов [7], в то время получил распространение гиросtabilизатор 4ГСП, в состав которого входит гиросtabilизированная платформа с волоконно-оптическими гироскопами и кардановый подвес. Современные отечественные системы гиросtabilизации кино- и телеаппаратуры основаны на том же принципе.

Важно отметить, что гироскопы, используемые в системах стабилизации, должны обладать высокой частотой обновления данных, поскольку чем раньше датчик зафиксирует изменение угловой скорости, тем быстрее управляющая электроника сможет отреагировать и скорректировать положение тела.

Спрос на небольшие ВОГ для систем стабилизации в России способна удовлетворить китайская компания BLITZ Sensor, дистрибьютором которой является компания «ИНЕЛСО». Для использования в системах стабилизации оптических и других систем на подвижном объекте подойдут компактные волоконно-оптические гироскопы BLITZ Sensor следующих серий:

- BS-FC24 – компактный волоконно-оптический гироскоп с аналоговым выходом;
- BS-FU091 – компактный волоконно-оптический гироскоп с аналоговым выходом и широкой полосой пропускания;
- BS-FU40 – компактный волоконно-оптический гироскоп с аналоговым выходом и небольшим дрейфом нуля;
- BS-FC095 – компактный волоконно-оптический гироскоп;
- BS-FU26/29/32/33/34/50 – волоконно-оптические гироскопы с разными диапазонами измерений в различных корпусах.

Важно отметить, что возможна доработка практически любого изделия по ТЗ заказчика. Практическим примером такого сотрудничества может служить проект, в котором время готовности гироскопа было уменьшено со стандартных для датчика 3 с до 0,3 с, чтобы соответствовать требованиям применения.

## НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ В СЕЙСМОРАЗВЕДКЕ

С середины двадцатого века, когда стали появляться и развиваться системы отслеживания землетрясений, гироскопы начали применяться в сейсморазведке. Первое применение гироскопа для отслеживания вращательной составляющей сейсмических волн приписывают У.Э. Фарреллу (W.E. Farrell), когда он использовал двухосевой гироскоп для отслеживания смещения и вращения зданий в ходе землетрясения в южной части Калифорнии магнитудой 6,5 баллов [10, 11]. Фаррелл проводил наблюдения в Ла-Холья (La Jolla, Сан-Диего, Калифорния, США), а само землетрясение произошло на горе Боррего (Borrego Mountain), в 115 км от места измерений. Тогда исследователь смог зафиксировать сдвиги зданий менее 1 см и поворот конструкций на 0,1 угловых секунд [12]. До этого исследования сейсмографы фиксировали только поступательную составляющую сейсмических волн.

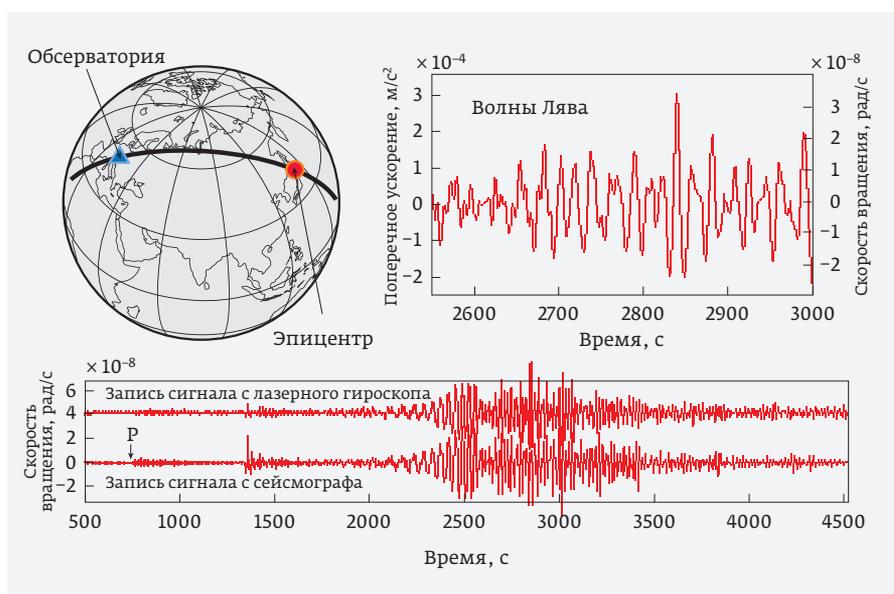
Постепенно волоконно-оптические и лазерные гироскопы вытеснили в этой сфере механические гироскопы, в первую очередь, благодаря высоким показателям чувствительности, что важно для отслеживания даже мельчайших сдвигов. И если в 1968 году были зарегистрированы сдвиги и поворот зданий в 115 км от эпицентра землетрясения, то



**Рис. 6.** Гиросtabilизатор ЗГСП, установленный на операторском кране [7]

в 2003 году лазерный гироскоп, установленный в Геодетической обсерватории Ветцелл (Geodetic Observatory Wettzell, Германия), зафиксировал вращательную составляющую сейсмических волн от землетрясения, произошедшего в префектуре Хоккайдо, Япония [13]. В своей статье ученые, проводившие исследования в данной обсерватории, приводят профили сигналов, снятых с сейсмографа и гироскопа, зафиксировавших волны (рис. 7).

В настоящее время для фиксирования как поступательной, так и вращательной составляющих сейсмических волн гироскопы стали входить в состав сейсмографов, а не использоваться исключительно как отдельный датчик [10]. Начата разработка трехосевого сейсмографа



**Рис. 7.** Расположение обсерватории относительно эпицентра землетрясения (данные с сейсмографа и гироскопа) [13]

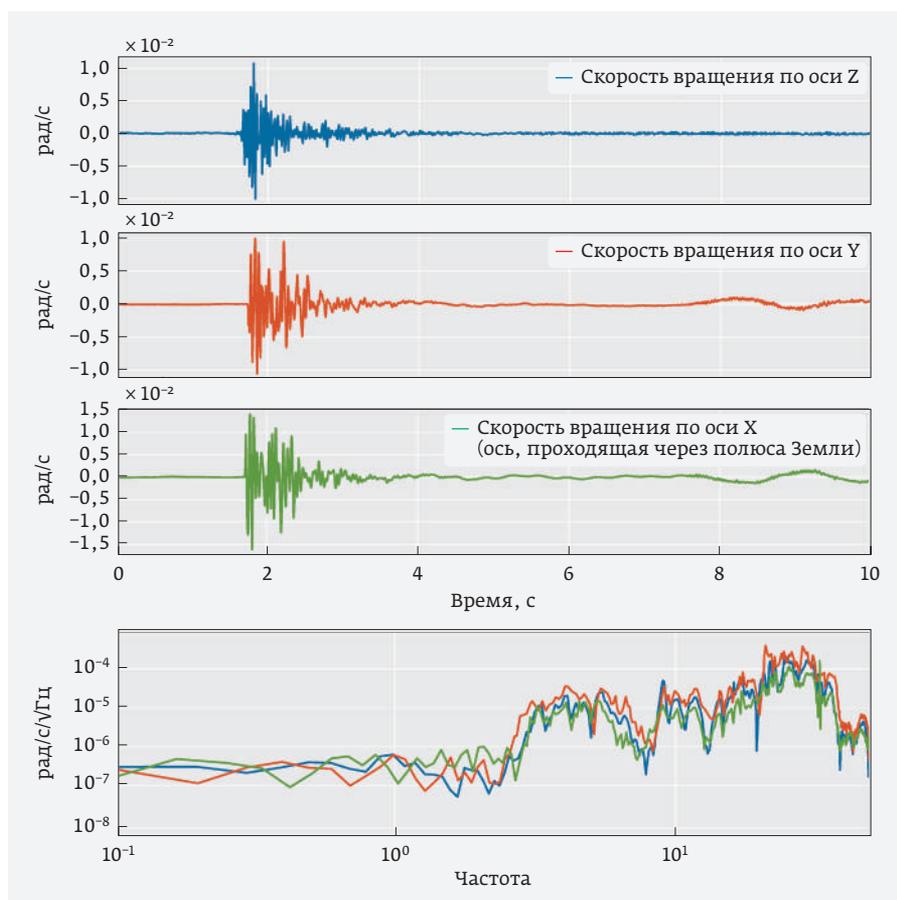
на основе ВОГ [14]. В [14] отмечается, что высокая чувствительность лазерных гироскопов является одновременно их преимуществом и недостатком: их можно использовать для фиксирования вращательной составляющей волн от землетрясений, удаленных на большое расстояние, но при этом при землетрясении в относительной близости лазерные гироскопы могут выйти из строя. По этой причине волоконно-оптические гироскопы, обладающие более низкой чувствительностью, являются более предпочтительными для регистрации сигналов волн от близких землетрясений. Кроме того, ВОГ более дешевые и компактные, что позволяет использовать их не только в стационарном, но и портативном сейсмографическом оборудовании.

Для сравнения на рис. 8 приведены профили сигналов с гироскопов, видно различие вращательной составляющей сейсмической волны в различных плоскостях. При наложении поступательной составляющей сейсмической волны и данных от гироскопов возможно составить общий профиль волны.

В настоящее время на рынке доступны стационарные и портативные сейсмографы различных производителей. На рис. 9 показан портативный сейсмограф французского производства. В его составе три волоконно-оптических гироскопа, обеспечивающих высокую точность измерений при компактных размерах (300×300×280 мм). Случайный угловой уход гироскопов в составе данного сейсмографа составляет 0,0005 °/ч. Важно, чтобы гироскопы, используемые в сейсмографическом оборудовании, обладали низким собственным шумом во избежание искажения результатов измерений.



**Рис. 9.** Портативный сейсмограф для регистрации вращательной составляющей сейсмических волн [15]



**Рис. 8.** Профиль вращательной составляющей сейсмической волны [14]

Такой сейсмограф, как заявлено на сайте производителя, возможно использовать, например, для контроля движения грунта и не обязательно в сейсмоопасных районах.

Для использования в различных системах для сейсморазведки, и им подобных системах с высокими требованиями к шумовым параметрам датчиков, стоит рассмотреть следующие модели гироскопов BLITZ Sensor:

- BS-GL50-4-D и BS-GL90-4-D – лазерные гироскопы;
- BS-FU28 и BS-FU29 – высокоточные одноосевые волоконно-оптические гироскопы со случайным угловым уходом от 0,0004 °/ч;
- BS-FU100-300-D3EC – трехосевой волоконно-оптический гироскоп.

\*\*\*

Во второй части статьи рассмотрим применение волоконно-оптических гироскопов в нефтегазовой промышленности и строительной отрасли, а также тенденции в разработке волоконно-оптических гироскопов и систем на их основе.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Track Geometry / <https://rail-vision.com/track/diagnostics/track-geometry/>
2. **Туан Ф.Н.** Оптико-электронная система контроля положения железнодорожного пути при его выправке. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук // Университет ИТМО, 2021
3. The Design and Implementation of an Inertial GNSS Odometer Integrated Navigation System Based on a Federated Kalman Filter for High-Speed Railway Track Inspection / <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/11/5244>
4. **Крылов К.Ю.** Разработка метода диагностирования краевых путей грузоподъемных машин и прогнозирования ресурса их ходовых колес. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / [https://tsu.tula.ru/files/67/Krylov\\_dissertation.pdf](https://tsu.tula.ru/files/67/Krylov_dissertation.pdf)
5. Гиростабилизатор. Большая советская энциклопедия: в 30-ти т. / 3-е изд. М.: Совет. энцикл., 1969–1986 // <https://www.booksite.ru/fulltext/1/001/008/010/715.htm>
6. **Малютин Д.М., Телухин С.В., Распопов В.Я.** Гиростабилизаторы оптической аппаратуры // Известия ТулГУ. Технические науки. 2016. Вып.10 / <https://www.booksite.ru/fulltext/1/001/008/010/715.htm>
7. **Кулешов А.В.** Гиростабилизаторы кинотелеаппаратуры (опыт разработки и применения) // <https://baumanka.pashinin.com>
8. Квадрокоптер DJI Phantom 4 Multispectral / <https://www.djimsk.ru>
9. Индикаторный гиростабилизатор телекамеры / <https://referat.ru/referat/indikatornyy-girostabilizator-telekamery-510108/2>
10. **Chen Y., Zhu L., Shi F., He Y., Li Z.** Perspective Chapter: Application of Gyroscopes in Geophysics / <https://www.intechopen.com/chapters/1163924>
11. Southern California Earthquake Data Center / <https://scedc.caltech.edu/earthquake/borrego1968.html>
12. **Farrell W.** A gyroscopic seismometer: Measurements during the Borrego earthquake. Bulletin of the Seismological Society of America / <https://pubs.geoscienceworld.org/ssa/bssa/article-abstract/59/3/1239/101572/A-gyroscopic-seismometer-Measurements-during-the>
13. **Igel H., Schreiber U., Flaws A., Schuberth B., Velikoseltsev A., Cochard A.** Rotational motions induced by the M8.1 Tokachi-oki earthquake, September 25, 2003 / <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2004GL022336>
14. **Cao Y., Chen Y. and others.** The Development of a New IFOG-Based 3C Rotational Seismometer / <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/11/3899>
15. Сейсмограф BlueSeis-3A / <https://www.rotational-seismology.org/events/workshops/2016/blueseis-3a.pdf>

ИНЕЛСО



## ЭЛЕКТРОННЫЕ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ КОМПОНЕНТЫ







ПРАВИЛЬНЫЕ КОМПОНЕНТЫ ДЛЯ ВАШИХ  
ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ ПРОДУКТОВ

inelso.ru
+7 (812) 628-00-16
sales@inelso.ru

**МОТОРЫ:** КОЛЛЕКТОРНЫЕ И БЕСКОЛЛЕКТОРНЫЕ  
**РЕДУКТОРЫ:** ВОЛНОВЫЕ И ПЛАНЕТАРНЫЕ  
**ДАТЧИКИ:** АБСОЛЮТНЫЕ И ИНКРЕМЕНТАЛЬНЫЕ ЭНКОДЕРЫ  
**КОНТРОЛЛЕРЫ:** ПОЛОЖЕНИЯ  
**ИНЕРЦИАЛЬНЫЕ ДАТЧИКИ:** ГИРОСКОПЫ, АКСЕЛЕРОМЕТРЫ, МАГНИТОМЕТРЫ  
**ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ:** AC-AC, AC-DC, DC-AC, DC-DC И ДР.



[www.inelso.ru](http://www.inelso.ru)