

# Синхронизация базовых станций в комплексированной навигационно-связной системе «КОНСУЛ-Р»

Е. Старовойтов, к. т. н.<sup>1</sup>, Е. Скиба<sup>2</sup>, И. Синильщиков<sup>3,4</sup>, А. Алпатов<sup>5</sup>

УДК 629.056.8 | ВАК 2.2.11

Обеспечение технологического суверенитета и непрерывного функционирования объектов критической инфраструктуры России требует создания в кратчайшие сроки новых технических систем, позволяющих закрыть брешы, вызванные потерей доступа к иностранным технологиям и решениям на их базе. Здесь отдельно следует выделить сферу навигации и связи, так как работа современных промышленных предприятий, функционирование логистических цепочек, транспортных сетей, экстренных служб невозможна без оперативного обмена данными между разнесенными абонентами и быстрого получения координатной информации. При решении этих задач предлагается использовать комплексированную навигационно-связную систему «КОНСУЛ-Р».

**Н**авигационное обеспечение должно быть независимым от наличия сигналов глобальных навигационных систем (ГНСС) типа ГЛОНАСС/GPS и от спутниковых группировок на низкой околоземной орбите типа Сфера/Starlink, а также быть устойчивым к преднамеренному искажению передаваемой координатной информации (спуфингу).

Для решения этих задач АО «НИИМА «Прогресс» разрабатывает аппаратно-программный комплекс средств программно-аппаратной платформы для системы интеллектуальной навигации с использованием технологии искусственного интеллекта. Комплекс должен обеспечивать:

- бесшовную навигацию подвижных объектов на открытой местности, в условиях городской застройки, в зонах с затрудненным приемом сигналов ГНСС, в промышленных сооружениях и на объектах критической инфраструктуры, внутри помещений;
- навигацию беспилотных и управляемых экипажем транспортных средств, перемещающихся по сухопутным беспилотным логистическим коридорам,

внутренним водным путям, протяженным промышленным территориям;

- навигацию транспортных средств, движущихся со скоростью до 150 км/ч.

Для выполнения этих требований в аналогичных системах для беспилотного транспорта и робототехники осуществляется анализ всех доступных навигационных данных [1].

В разрабатываемом комплексе применяются алгоритмы навигации с использованием методов искусственного интеллекта для обработки данных ГНСС, анализа окружающей электромагнитной обстановки, видеоданных, результатов лазерного сканирования и данных локального радионавигационного поля, создаваемого локальной системой навигации (ЛСН), при необходимости дополняемых информацией от других датчиков.

ЛСН является одной из основных составных частей комплекса, обеспечивающей навигацию при отсутствии сигналов ГНСС.

## СИСТЕМЫ ЛОКАЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ

АО «НИИМА «Прогресс» имеет опыт создания и экспериментальных исследований ЛСН. Предприятием была разработана комплексированная навигационная система услуг навигации («КОНСУЛ») на основе ЛСН, построенная на базе интегральных схем собственной разработки (K5200MX014 и K1917BC024) [2].

ЛСН такого типа создает навигационное поле в зоне действия предварительно развернутых радионавигационных опорных станций (РОС), играющих роль так называемых

<sup>1</sup> АО «НИИМА «Прогресс», заместитель начальника отдела разработки смешанных СВЧ-модулей.

<sup>2</sup> АО «НИИМА «Прогресс», начальник отдела главного конструктора.

<sup>3</sup> ООО «Райтек», заместитель генерального директора по науке.

<sup>4</sup> МГУ им. М.В.Ломоносова, факультет вычислительной математики и кибернетики.

<sup>5</sup> ООО «Райтек», руководитель направления радиоэлектроники.

«псевдоспутников» (Pseudolite – pseudosatellite), по дальности до которых определяются координаты абонента.

В системе «КОНСУЛ» используются два метода определения местоположения: запросный и беззапросный. Запросный метод обеспечивает меньшую погрешность определения координат, но в этом случае абонентский терминал должен включать радиопередатчик, наличие которого ухудшает массогабаритные характеристики и увеличивает потребляемую мощность. Поэтому в ЛСН для подвижных абонентов планируется использовать беззапросный метод измерений.

Для работы в беззапросном режиме осуществляется синхронизация абонентских устройств и РОС, при этом дальность до РОС определяется как

$$R = \Delta t \cdot c, \quad (1)$$

где  $\Delta t$  – задержка между импульсом метки времени и приходом радиосигнала;  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с – скорость света.

Погрешность измерений беззапросным методом равна

$$\Delta R = c \cdot (\Delta t_{\text{изм}} + \Delta t_{\text{схр}}), \quad (2)$$

где  $\Delta t_{\text{изм}}$  – ошибка измерения времени прихода радиосигнала;  $\Delta t_{\text{схр}}$  – ошибка синхронизации РОС.

Ошибки измерения времени прихода радиосигнала и синхронизации РОС, помехи в результате многолучевого распространения являются основными техническими проблемами при создании ЛСН в рамках совместных работ АО «НИИМА «Прогресс» и ООО «Райтек».

## ЛОКАЛЬНАЯ НАВИГАЦИЯ НА БАЗЕ ТЕХНОЛОГИИ LTE

Для решения задач навигации и мониторинга групп объектов требуется передача рассчитанных на абонентских устройствах координат в сервисы верхнего уровня, что предполагает наличие дополнительного беспроводного канала связи. Возможно объединение ЛСН и системы связи в едином протоколе. Например, начиная с версии 9, в стандарт LTE была добавлена поддержка беззапросного метода навигации, а с выходом версии 16 в технологию 5G был добавлен и запросный метод, однако детали алгоритмов позиционирования полностью остаются на усмотрение разработчика.

Комплексированная навигационно-связная система «КОНСУЛ-Р» реализуется на основе сети технологической радиосвязи технологии LTE разработки ООО «Райтек». Эта ЛСН предназначена для системы

интеллектуальной навигации, в аппаратной части которой используется микропроцессор или специализированное ядро, созданные для целей обучения или исполнения моделей искусственного интеллекта.

Система «КОНСУЛ-Р» создает локальное радионавигационное поле на выбранной территории за счет сигналов, полученных при комплексировании технологий радионавигации и радиосвязи LTE, которые могут быть использованы для навигации транспортных средств [3]. Основные характеристики «КОНСУЛ-Р» и описание составных частей системы представлены в табл. 1.

Из-за узкой полосы частот (20 МГц) в данной системе затруднительно осуществить разделение каналов «вниз» и «вверх» по частоте (FDD), поэтому используется временной дуплекс (TDD), реализация которого является отдельной задачей, требующей доработки структуры ЛСН.

Радионавигационное поле «КОНСУЛ-Р» формируется отдельными радионавигационными сотами, состоящими из четырех-шести РОС-Р (базовых станций), расположенных на одной территории с частотно-временным разделением сигналов (рис. 1).

Для формирования радионавигационного поля требуется, чтобы АТБ-Р в каждый момент времени получал сигнал от нескольких РОС-Р, в то время как для решения задачи связи в LTE (без использования технологии Carrier Aggregation) перекрытие секторов разных базовых станций может приводить к ухудшению качества сигнала. Поэтому в системе «КОНСУЛ-Р» предусмотрены расширения стандартных алгоритмов минимизации интерференции, позволяющие обеспечить как перекрытие навигационных сигналов, так и разделение связных сигналов.

РОС-Р предполагается реализовать на базе базовой станции LTE TDD централизованной архитектуры, в которой один процессорный блок BBU обслуживает несколько радиомодулей (RRU). Специализированный

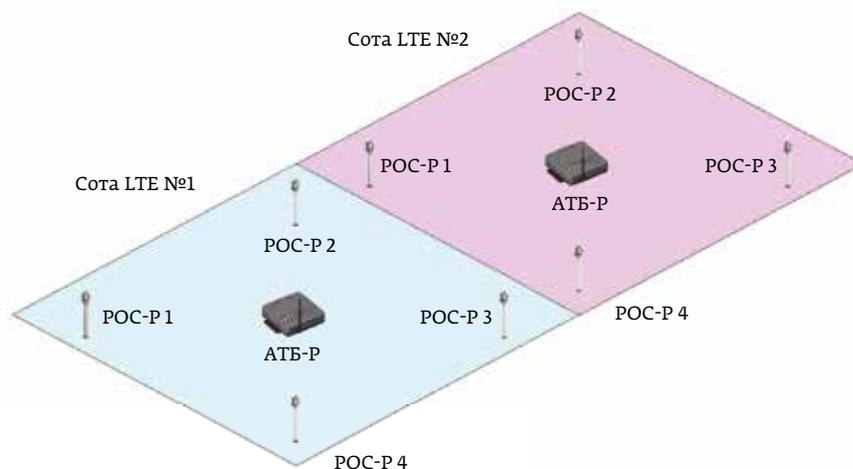


Рис. 1. Соты LTE, формирующие навигационное поле системы «КОНСУЛ-Р»

Таблица 1. Основные характеристики и составные части системы «КОНСУЛ-Р»

Параметр	Значение
Рабочий диапазон частот	350...370 МГц
Пропускная способность вниз	66 Мбит/с
вверх	23 Мбит/с
Площадь зоны покрытия	100 км <sup>2</sup>
Диапазон высот абонента в зоне покрытия относительно подстилающей поверхности	0...300 м
Погрешность определения координат, СКО в плане	15 м
по высоте	8 м*
Используемые системы координат	ПЗ-90, WGS-84
Состав системы:	
радионавигационная опорная станция (РОС-Р)	Базовая станция, обеспечивающая формирование локального радионавигационного поля
абонентский терминал базовый (АТБ-Р)	Терминал навигационно-связной с нейропроцессорным вычислителем и интерфейсами для подключения дополнительных датчиков (телекамер, лидаров и др.)
радиорелейная линия (РРЛ)	Радиорелейная линия с поддержкой протокола IEEE1588 v.2
аппаратно-программный комплекс (АПК) ядра сети	Поддержка до пяти базовых станций LTE TDD, регистрации до 100 АТБ-Р и поддержка стандартного функционала ядра сети LTE, размещенного на отдельном аппаратном сервере
программное обеспечение (ПО) РОС-Р LTE	Обеспечение функционала работы комплексированной навигационно-связной системы
коммутатор	Обеспечение синхронизации времени
Grand Time Master	Стандарт времени

\*При использовании дополнительного оборудования.

навигационный программный модуль формирует единое частотно-временное расписание излучения для всех RRU. Радиомодули RRU подключаются по технологии «Радио-через-Ethernet» в соответствии с открытым протоколом eCPRI (рекомендация ORAN-WG4.CUS.0-v02.00, split 8) или по выделенной оптоволоконной линии с использованием традиционного протокола CPRI. Процессорный блок BBU реализован на универсальном сервере, на котором непосредственно размещены навигационные приложения, что позволяет существенно снизить величину задержек навигационной системы по сравнению с размещением приложений в ядре сети LTE.

Для синхронизации (согласования частот) базовых станций LTE в «КОНСУЛ-Р» используется протокол SyncE (Synchronous Ethernet) – технология синхронизации Ethernet-сигналов с внешним источником частоты. SyncE

позволяет с высокой точностью синхронизировать порты Ethernet-устройств из состава изделия. Используя частоту оптического Ethernet как опорную, радиомодули с высокой точностью формируют несущую частоту радиопередатчика. Таким образом, все радиопередатчики сети работают на одной частоте с минимальными фазовыми шумами. Синхронизация по времени обеспечивается использованием протокола PTP v.2 (Precision Time Protocol), реализующего запросный метод синхронизации с внешним источником времени поверх сети Ethernet. Обработка PTP-пакетов в конечных устройствах сети с использованием технологии SyncE позволяет достигать точности единого времени в устройствах сети порядка единиц наносекунд.

Дальнейшее улучшение качества синхронизации возможно с переходом на протокол White Rabbit, также работающий поверх сети Ethernet, но требующий

использования более специализированного сетевого оборудования.

Достижимую точность единого времени можно обосновать следующим образом. Разница в показаниях шкал времени у базовой станции и абонента (ошибка временного интервала) составляет [4]

$$\Delta\varphi(t) \geq x_0 + y_0 + \frac{D \cdot t^2}{2} + \frac{\varepsilon(t)}{2\pi \cdot f_{\text{ном}}}, \quad (3)$$

где  $x_0$  – начальный сдвиг фазы;  $y_0$  – нормированная частота;  $D$  – дрейф;  $\varepsilon(t)$  – фазовый шум,  $f_{\text{ном}}$  – номинальное значение рабочей частоты.

Делая допущение об отсутствии дрейфа, фазовых шумов и погрешности подстройки частоты, получаем

$$\Delta\varphi(t) = y \cdot t, \quad (4)$$

где  $y$  – расхождение частот опорных генераторов базовой станции и абонента. Отсюда, погрешность синхронизации в значительной степени будет зависеть от возмущений в канале связи

$$\Delta\varphi(t) \sim y \cdot t. \quad (5)$$

Таким образом, для повышения точности синхронизации необходимо поддерживать высокое качество параметров канала тактовой сетевой синхронизации, что может быть обеспечено только технологией SyncE. Чем ближе к физическому уровню передаются метки времени, тем проще и точнее осуществляется синхронизация.

В режиме отслеживания частотной синхронизации основное влияние на ошибку временного интервала оказывают случайные составляющие, выражение (4) принимает вид

$$\Delta\varphi(t) = x_0 + \frac{\varepsilon(t)}{2\pi \cdot f_{\text{ном}}}. \quad (6)$$

При этом случайная составляющая в правой части вносит значительно меньшую погрешность, чем систематические составляющие модели ошибки временного интервала или величины асимметрии протокола PTP.

При построении транспортной сети LTE для синхронизации РОС-Р вместо прокладки оптоволоконных линий предложено использовать РРЛ, что позволяет уменьшить капитальные затраты и ускорить развертывание сети. В целях организации транспортной сети с необходимой точностью временной синхронизации предполагается использовать коммутаторы с поддержкой РТР, получающие сигнал синхронизации от сервера источника точного времени. Все коммутаторы и модули РРЛ в составе сети РОС-Р поддерживают РТР и SyncE. Схема синхронизации показана на рис. 2.

Для подтверждения принятых технических решений были изготовлены макеты системы и экспериментального стенда.

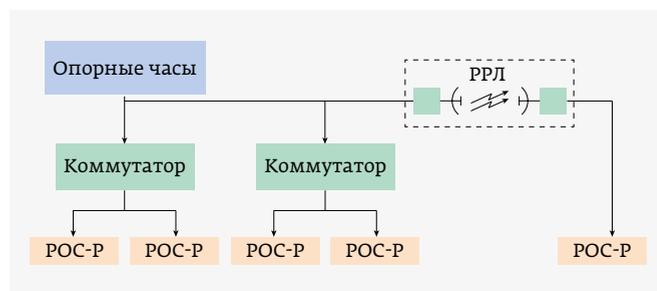


Рис. 2. Схема синхронизации составных частей системы «КОНСУЛ-Р»

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе экспериментальных исследований проверялась возможность инженерного образца РОС-Р обеспечивать синхронизацию излучения собственных радионавигационных сигналов с излучением радионавигационных сигналов других РОС-Р не хуже, чем  $10^{-8}$  с, а также влияние элементов транспортной сети IEEE1588 v.2 (коммутатора с поддержкой РТР) на точность излучения радионавигационных сигналов других РОС-Р.

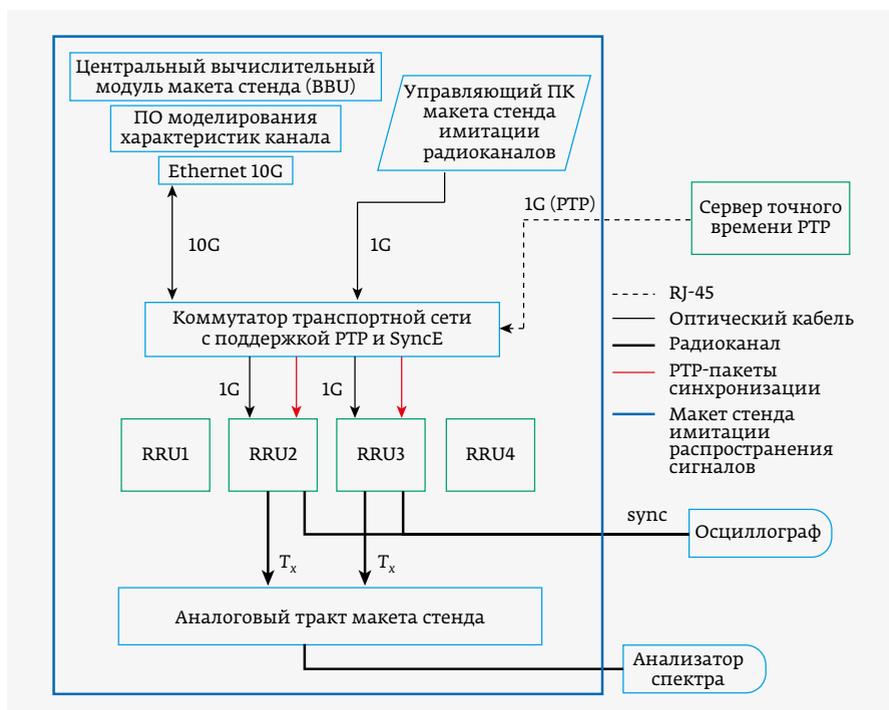
В ООО «Райтек» был собран макет стенда от ВВU до коммутатора, в соответствии со схемой, показанной на рис. 3. В первом случае источником синхронизации являлся инженерный образец РОС-Р (линии связи, выделенные красным, не использовались).

При проверке на экране осциллографа (рис. 4) наблюдались импульсы синхронизации, соответствующие началу фрейма LTE (период 10 мс). Размытие фронта импульса синхронизации соответствует точности синхронизации инженерных образцов РОС-Р между собой. Также наблюдалась гистограмма распределения величины рассинхронизации между инженерными образцами RRU.

Далее была собрана схема с подключением RRU2 и RRU3 через коммутатор транспортной сети (красные линии на рис. 3). Источником РТР-пакетов синхронизации в этой схеме является сервер точного времени.

Изображение экрана осциллографа представлено на рис. 5. В нижней части видны мгновенные изображения фронтов импульсов синхронизации RRU2 и RRU3, а в верхней части показана гистограмма значений рассинхронизации между сигналами синхронизации RRU2 и RRU3.

В результате было установлено, что в случае, когда источником синхронизации при прямом подключении приемопередатчиков инженерных образцов РОС-Р оптическим кабелем Ethernet величина рассинхронизации между образцами составляет не более  $8 \cdot 10^{-9}$  с. Дискретность расхождения связана с особенностями присвоения метки времени входящим Ethernet-пакетам и может быть уменьшена с помощью дополнительных аппаратных средств в протоколе White Rabbit.

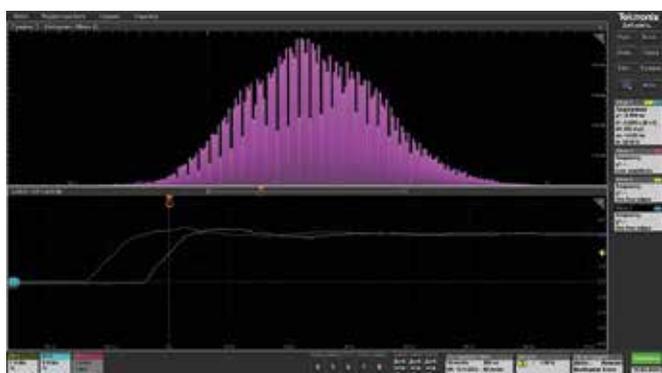


**Рис. 3.** Схема макета экспериментального стенда для оценки точности синхронизации инженерных образцов POC-P

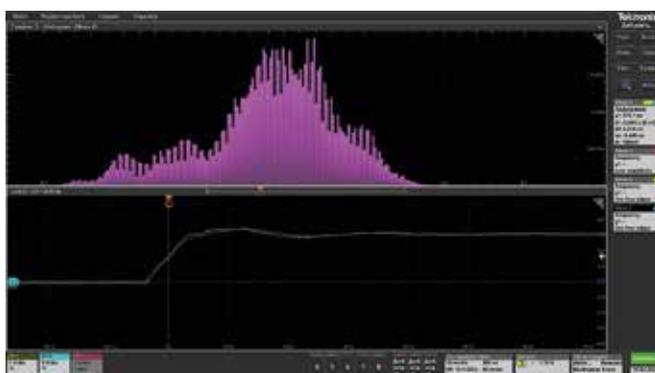
Также установлено, что когда источником PTP-пакетов синхронизации является сервер точного времени, а инженерные образцы подключены кабелями к коммутатору по протоколу PTP v.2, величина рассинхронизации между инженерными образцами POC-P не превышает  $1 \cdot 10^{-8}$  с.

\*\*\*

Экспериментальные исследования на инженерных образцах подтвердили возможность обеспечения синхронизации с наносекундной точностью базовых станций



**Рис. 4.** Осциллограмма рассинхронизации при использовании в качестве источника синхронизации одного из инженерных образцов POC-P



**Рис. 5.** Осциллограмма рассинхронизации при синхронизации инженерных образцов POC-P через коммутатор

(POC-P) с помощью PTP-пакетов синхронизации. Таким образом, разрабатываемая комплексированная навигационно-связная система на основе сети технологической радиосвязи технологии LTE может достигнуть погрешности определения координат, позволяющей ее применить в системе интеллектуальной навигации с использованием технологии искусственного интеллекта.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. **Трефилов П.М., Романова П.А.** Формирование достоверной навигационной информации в задачах ориентации и навигации автономных робототехнических устройств с использованием инфраструктуры интеллектуальной транспортной среды // Управление большими системами: сборник трудов. 2023. № 106. С. 71–95.
2. **Корнеев И.Л., Кузнецов А.С., Королев В.С.** Режимы работы локальной системы навигации в проекте «КОНСУЛ». Потребители системы «КОНСУЛ» // НАНОИНДУСТРИЯ. Спецвыпуск. 2021. 7с. Т.14 (107). С. 57–59.
3. **Driusso M., Marshall C., Sabathy M., Knutti F., Mathis H., Babich F.** Vehicular Position Tracking Using LTE Signals // IEEE Transactions on Vehicular Technology. V. 66. no. 4. PP. 3376–3391. April 2017. DOI: 10.1109/TVT.2016.2589463.
4. **Бирюков Н.Л., Триска Н.Р.** Синхронный Ethernet как основа частотно-временного обеспечения современных и будущих сетей связи // Электросвязь. 2013. № 2. С. 8–12.

# ИСПЫТАНИЯ

## НА УСТОЙЧИВОСТЬ К ВОЗДЕЙСТВИЮ СОЛЯНОГО ТУМАНА ДЛЯ ОБОРУДОВАНИЯ И ЭКБ



Испытания на устойчивость к воздействию соляного тумана представляют собой метод проверки долговечности и надежности различных видов оборудования и электронной компонентной базы в условиях агрессивной коррозионной среды. Этот процесс включает в себя воздействие на образцы мелкодисперсного соляного аэрозоля в специальной камере, имитирующей морскую атмосферу или другие суровые эксплуатационные условия.



### МЕТОД ПРОВЕДЕНИЯ

Испытания на устойчивость к соляному туману проводятся в специализированных камерах, где поддерживается постоянная температура и влажность, а также распыляется соляной раствор.

Образцы подвергаются воздействию соляного тумана в течение заданного времени, которое может варьироваться от нескольких часов до нескольких недель, в зависимости от требований стандарта и специфики продукции.

После завершения тестирования проводится анализ состояния образцов, включая визуальную оценку и измерение степени коррозионного поражения.

### НЕОБХОДИМОСТЬ ИСПЫТАНИЙ

Соленая среда — это один из самых агрессивных факторов, вызывающих коррозию.

Испытания помогают определить, насколько оборудование и компоненты устойчивы к коррозии, что особенно важно для продукции, эксплуатируемой в морских и прибрежных зонах.

Продукты, прошедшие испытания, демонстрируют свою способность сохранять функциональность и работоспособность даже в условиях повышенной влажности и коррозионного воздействия. Это важно для потребителей, которые рассчитывают на долговечность и надежность своих покупок.

Многие отрасли промышленности требуют строгого соответствия международным и национальным стандартам по устойчивости к коррозии. Прохождение таких испытаний подтверждает соответствие продукции стандартам, что повышает её конкурентоспособность на рынке.

АО «ТЕСТПРИБОР» проводит испытания на устойчивость к соляному туману в собственной аккредитованной лаборатории, оснащенной всем необходимым современным оборудованием.

### ПРЕИМУЩЕСТВА ИСПЫТАНИЙ

Раннее выявление потенциальных проблем с коррозией позволяет внести необходимые изменения в конструкцию или материалы до массового производства, что снижает вероятность отказов в реальных условиях эксплуатации.

Продукты, которые успешно прошли испытания, демонстрируют высокую устойчивость к коррозии, что гарантирует их долгий срок службы даже в самых агрессивных средах.

Наличие результатов испытаний, подтверждающих устойчивость продукции к соляному туману, повышает доверие потребителей и уверенность в качестве и надежности продукции.

Испытания на устойчивость к воздействию соляного тумана являются важной частью процесса обеспечения качества и надежности оборудования и электронной компонентной базы.

Эти испытания помогают выявить слабые места в конструкции и материалах, обеспечить соответствие международным стандартам и увеличить срок службы продукции. Если вы хотите гарантировать своим клиентам высокое качество и долговечность вашей продукции, проведение таких испытаний — это необходимый шаг.



+7 (495) 657-87-37



tp@test-expert.ru  
www.test-expert.ru



125480, г. Москва,  
ул. Планерная, д. 7А