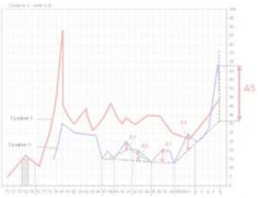
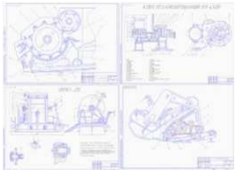


ОАО «Конструкторское бюро опытных работ»



Экспертно-аналитическая система моделирования, проектирования и контроля приемо-передающих, антенно-фидерных модулей и тракта распространения СШП сигналов ЭАС «МСР-Импульс»

Актуальность

«…Важнейшая задача, стоящая перед радиоэлектронной промышленностью, – **повышение конкурентоспособности продукции** предприятий. В сложившейся ситуации отечественные промышленные предприятия в ближайшие годы должны осуществить **комплексное (техническое, технологическое, информационное и кадровое) перевооружение**, без которого невозможно решить проблему обеспечения производства конкурентоспособной радиоэлектронной продукцией…» *А. Якунин, директор ДРЭП*

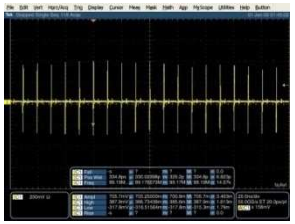
Внедрение экспертно-аналитической системы на предприятии РЭП позволит за счет создания адекватных математических и функциональных моделей изделий на ранних этапах проектирования и ухода от дорогостоящего промежуточного физического макетирования:

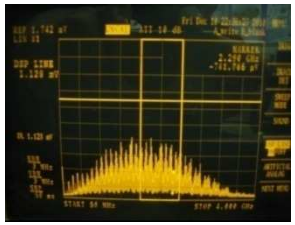
- уменьшить трудоемкость, стоимость и время разработки изделий
- улучшить точностные характеристики изделий за счет постоянного их контроля
- оптимизировать конструкцию и технологию изготовления изделия
- проводить математическое моделирование изделий с предельными параметрами, не поддающимися физическому моделированию
- ввести оптимальное бизнес-планирование и электронный документооборот
- вести круглосуточный расчет и моделирование изделий, а также постоянный контроль за ходом разработки за счет удаленного доступа к вычислительным ресурсам
- нарастить вычислительные мощности за счет рационального применения суперкомпьютеров

Что такое экспертно-аналитическая система?

Это ядро интегрированного комплекса автоматизации предприятия, с помощью которого осуществляется поддержка жизненного цикла изделия в соответствии с концепцией **CAD/CAM/CAE/PLM** и **CALS-**технологий.

Специфической особенностью экспертно-аналитической системы «МСР-Импульс» является ее **специализация** для разработки радиоэлектронных изделий, использующих **импульсные сверхширокополосные (СШП) сигналы** с крайне малыми длительностями и сверхшироким спектром, что приводит к необходимости включения в состав системы **мощных программных комплексов**, требующих больших вычислительных ресурсов, а также **высокопроизводительного и высокоточного контрольно-измерительного оборудования**, позволяющего регистрировать и производить измерения параметров данного типа сигналов.





Отличительной чертой ЭАС «МСР-Импульс» является тот факт, что в её состав введена **автоматизированная система сбора и обработки информации**, позволяющая **объединить в единый комплекс результаты моделирования, проектирования и измерений** и обеспечить к ним **доступ сотрудников и заказчиков** как внутри отдельного предприятия, так и за его пределами с помощью **удаленного соединения** через защищенный веб-интерфейс.

Структурная схема ЭАС «МСР-Импульс»

Экспертно-аналитическая система моделирования и контроля приемо-передающих, антенно-фидерных модулей и влияния среды распространения СШП сигналов

Блок систем автоматизированного проектирования

- Математическое моделирование модулей и тракта распространения сигналов
- Функциональное моделирование модулей
- Проектирование модулей и оформление документации
- Прототипирование и макетирование модулей

Блок испытательных стендов

- Стенд статических измерений и контрольно-измерительной аппаратуры
- Стенд динамических измерений
- Стенд полевых испытаний

Блок сбора, обработки и анализа результатов

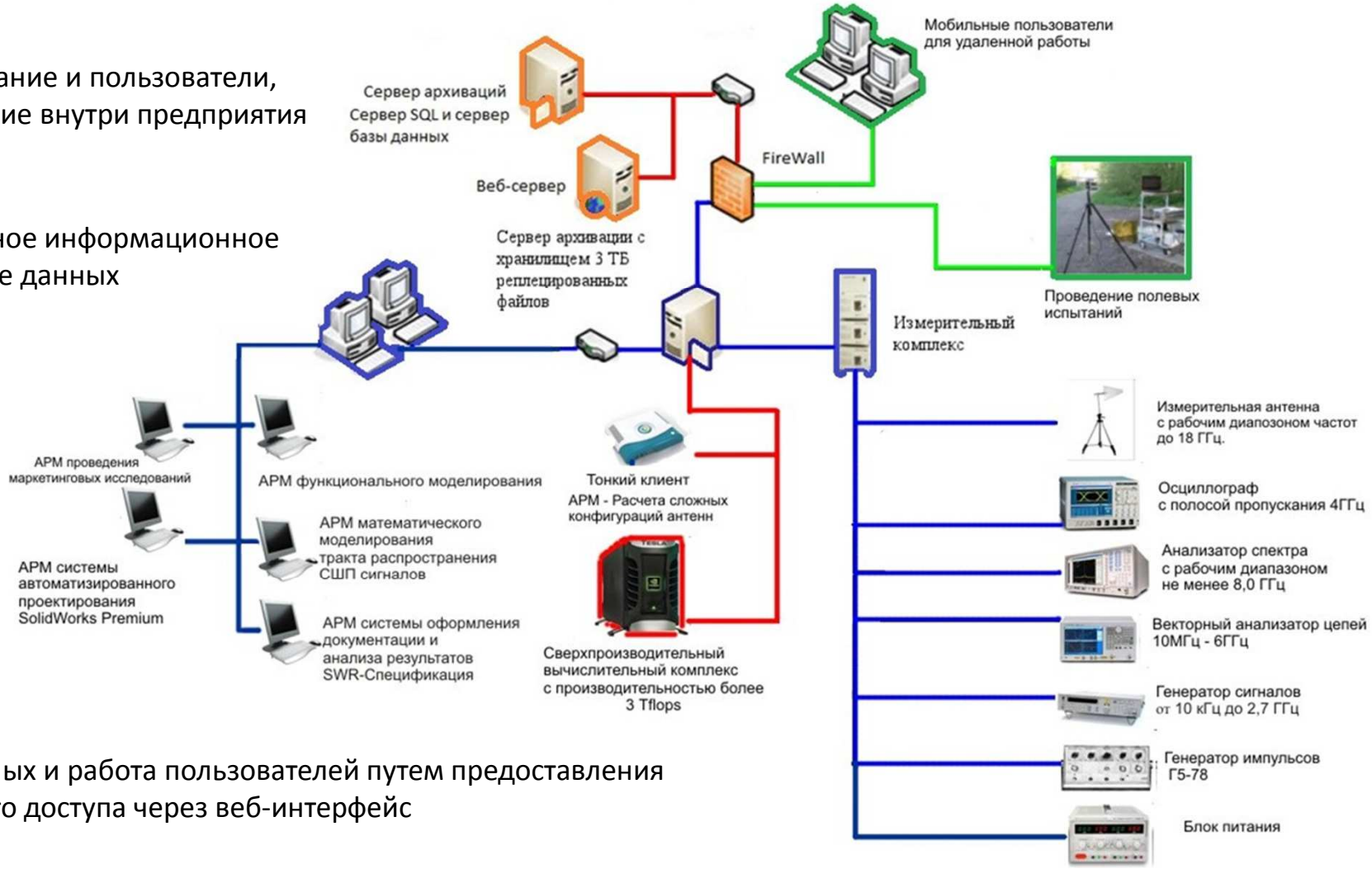
- Система управления инженерными данными
- Система удаленного доступа к ресурсам ЭАС
- Сервер баз данных, веб-сервер и локальная вычислительная сеть

Схема построения ЭАС «МСР-Импульс»

Оборудование и пользователи, работающие внутри предприятия

Защищенное информационное хранилище данных

Сбор данных и работа пользователей путем предоставления удаленного доступа через веб-интерфейс



Блок систем автоматизированного проектирования

Математическое моделирование

- Расчет и математическое моделирование параметров изделий: приемо-передающих и антенно-фидерных СШП модулей
- Математическое моделирование тракта распространения СШП сигналов

Функциональное моделирование

- Выбор типа и моделирование основных параметров антенно-фидерных СШП модулей
- Моделирование изделия в целом с заданием параметров всех его модулей и тракта распространения сигналов

Электродинамическое моделирование

- Моделирование антенн и СВЧ трактов приемо-передающих модулей по заданным параметрам с добавлением методов физической оптики и теории дифракции

Схемотехническое моделирование

- Моделирование схем электрических принципиальных, разработка печатных плат приемо-передающих модулей

Проектирование конструкции

- Проектирование изделий, сборок, расчеты на прочность
- Оформление конструкторской и технологической документации

Прототипирование

- Изготовление печатных плат, монтаж компонентов на сборочной линии
- 3D печать для изготовления корпусов прототипов изделий

Система управления инженерными данными

Блок испытательных стендов

Стенд статических измерений и контрольно-измерительной аппаратуры

- Осциллограф с эквивалентной скоростью сэмплирования не менее 200,0 ГВыборок/с
- Анализатор спектра с рабочим диапазоном не менее 8,0 ГГц
- Векторный анализатор цепей с рабочим диапазоном не менее 6,0 ГГц
- Генератор импульсов длительностью от 1 нс
- Измерительная антенна с рабочим диапазоном не менее 0,5-3,0 ГГц

Стенд динамических измерений с использованием непрозрачных сред

- Комплекс препятствий из многослойных непрозрачных сред
- Система радиолокационных отражателей

Стенд полевых испытаний

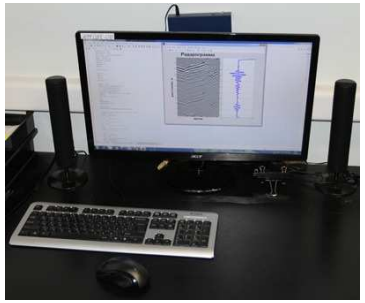
- Мобильный векторный анализатор цепей с рабочим диапазоном не менее 8,0 ГГц
- Мобильный анализатор спектра с рабочим диапазоном не менее 8,0 ГГц
- Испытательный полигон

Система приема и обработки данных измерений, основанная на протоколах GPIB, HTTP, FTP, ICMP

Математическое моделирование

Данный компонент ЭАС «МСР-Импульс» позволяет выполнять следующие задачи:

- **предварительный оценочный расчет характеристик разрабатываемого изделия и определение требований к его параметрам**
- **математическое моделирование параметров изделия и работы отдельных его модулей**
- **расчет входных сигналов приемника, отраженных от радиолокационной сцены (включая непрозрачные среды) для системы радиолокации или распространившихся по радиоканалу для системы радиосвязи**
- **выбор алгоритмов обработки сигналов**



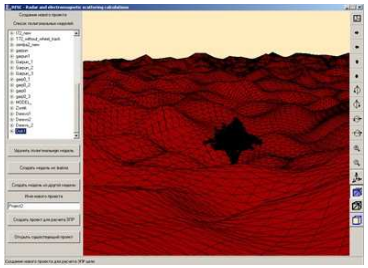
АРМ комплекса математического моделирования ЭАС «МСР-Импульс»

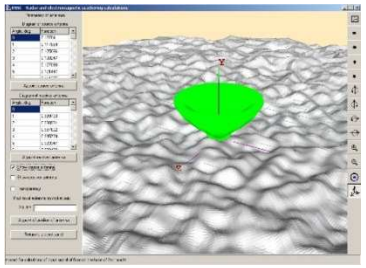
Предлагаемые программные комплексы

Mathcad

MATLAB
The Language of Technical Computing

Разработанный совместно с МГТУ им. Н.Э. Баумана отечественный программный комплекс расчета трактов распространения сигналов, адаптированный для СШП сигналов, **СШПС-Тракт**





Функциональное моделирование

Данный компонент ЭАС «МСР-Импульс» позволяет выполнять следующие задачи:

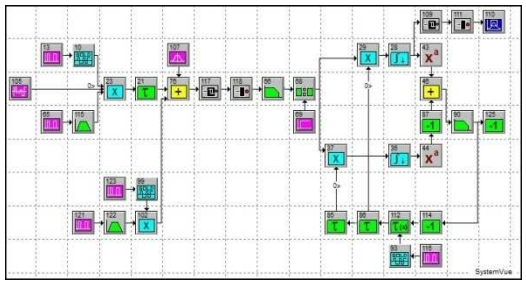
- **выбор типа антенны под решаемую задачу**
- **моделирование основных параметров антенны**
- **функциональное моделирование всего изделия в целом с заданием параметров каждого модуля изделия и тракта распространения сигналов**

АРМ комплекса функционального моделирования ЭАС «МСР-Импульс»

Предлагаемые программные комплексы

AntennaMagus
Explore.Design.Deliver.

SystemVue
Electronic System-Level Design
Agilent Technologies



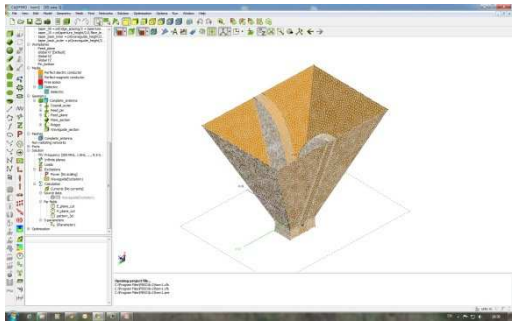
Электродинамическое моделирование

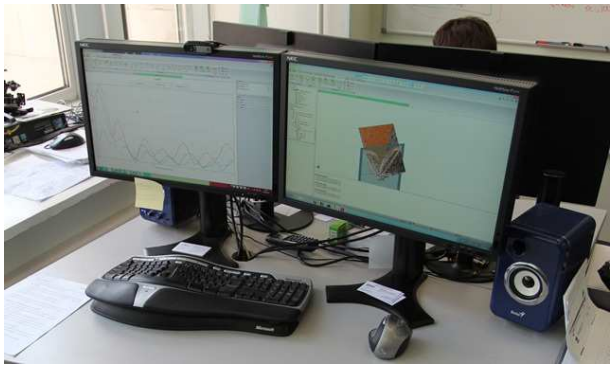
Данный компонент ЭАС «МСР-Импульс» позволяет выполнять следующие задачи:

- **анализ и расчет параметров антенн различных типов (рупорных, микрополосковых, проволочных и т.д.)**
- **анализ различных аспектов электромагнитной совместимости, включая эффективность экранирования корпусом, межкабельное прохождение сигналов и т.д.**
- **анализ и расчет параметров СВЧ компоненты и приемо-передающих трактов (волноводных структур, фильтров, направленных ответвителей и т.д.)**
- **расчет рассеяния излучения электромагнитных волн различными объектами, расчет ЭПР**

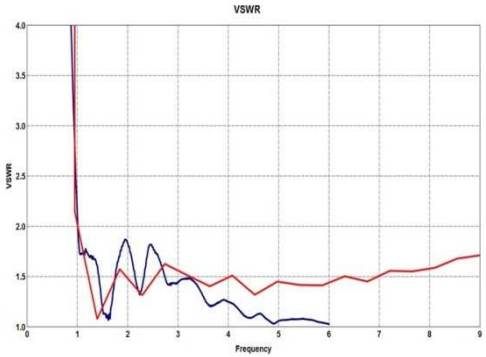
Предлагаемые программные комплексы

FEKO
Comprehensive Electromagnetic Solutions





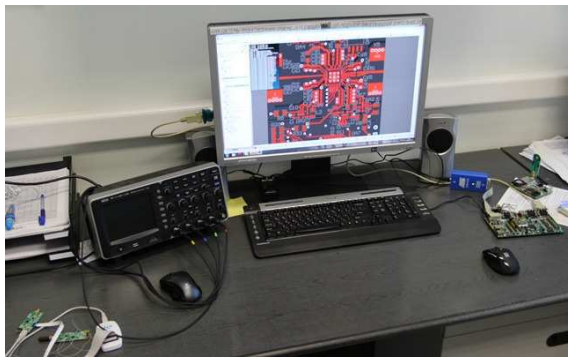
АРМ комплекса электродинамического моделирования ЭАС «МСР-Импульс»



Схемотехническое моделирование

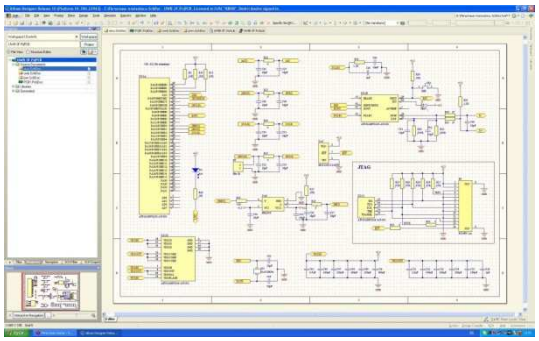
Данный компонент ЭАС «МСР-Импульс» позволяет выполнять следующие задачи:

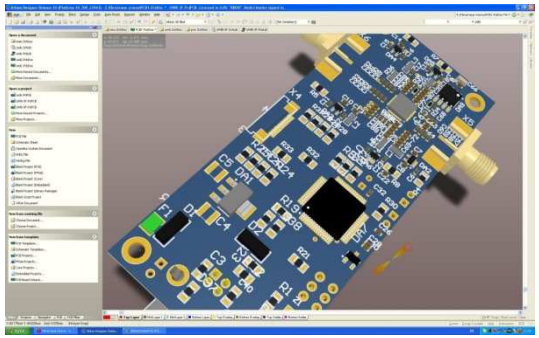
- **тестирование и анализ принципиальных электрических схем (частотный анализ в режиме малого сигнала, анализ переходных процессов, расчет спектральной плотности внутреннего шума, спектральный анализ Фурье, расчет влияния изменения температур и т.д.)**
- **возможности математической обработки рассчитанных сигналов, анализ целостности сигналов**
- **автоматизированное размещение компонентов и трассировка проводников на печатных платах**
- **импорт и экспорт файлов, выпуск документации и т.д.**



АРМ комплекса схемотехнического моделирования ЭАС «МСР-Импульс»

Предлагаемые программные комплексы

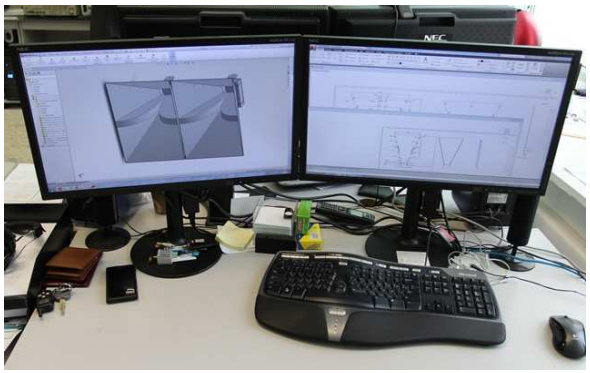




Проектирование конструкции изделий

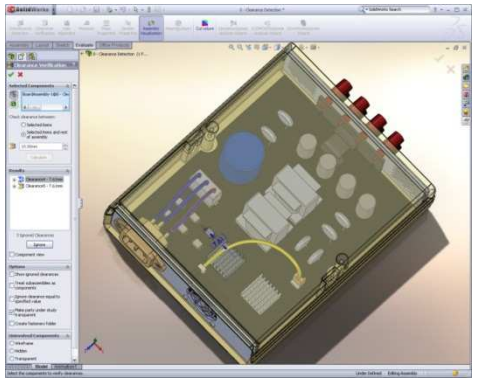
Данный компонент ЭАС «МСР-Импульс» позволяет выполнять следующие задачи:

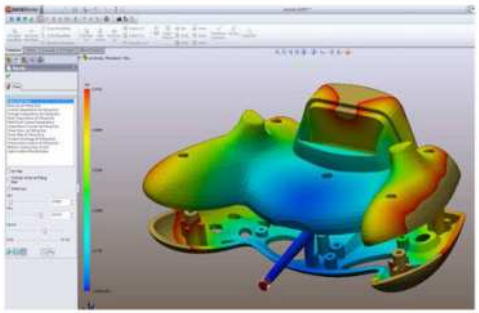
- **проведение трехмерного проектирования изделий (деталей и сборок) любой степени сложности с учетом специфики изготовления**
- **осуществление инженерного анализа (прочность, устойчивость, теплопередача и т.д.)**
- **осуществление анализа технологичности конструкции изделия и анализа технологичности процессов изготовления**
- **создание конструкторской документации и техно-логической документации в соответствии с ЕСКД, ЕСТД**



АРМ комплекса проектирования конструкции изделий ЭАС «МСР-Импульс»

Предлагаемые программные комплексы





Прототипирование изделий

Данный компонент ЭАС «МСР-Импульс» позволяет выполнять следующие задачи:

- **создание прототипов изделий для проверки их работоспособности и устранения возможных ошибок, допущенных на стадии проектирования**
- **решение маркетинговых задач (демонстрация на выставке или инвестору, подготовка к сертификации)**
- **проверка готовности изделия к серийному производству, проверка технологичности изделия**

Используемые методы прототипирования:

- **технология поверхностного и выводного монтажа печатных плат макетных образцов изделий**
- **FDM технология (3d печать) - изготовление макетов деталей методом послойной укладки полурасплавленной полимерной нити в соответствии с геометрией математической модели детали, разработанной на этапе 3D-проектирования**

Пример сборочной линии по монтажу печатных плат прототипов изделий

Объем производства	50 модулей в месяц
Класс точности пайки	5 класс точности
Соответствие требованиям	RoHS
Покрытие площадок	бессвинцовый HASL
Точность установки компонентов	±25 мкм
Ширина печатного проводника	200 мкм
Диаметры металлизированных отверстий	300 мкм
Минимальный размер контактной площадки	300 мкм
Необходимая производственная площадь	18 м2
Рабочий персонал	2 чел.
Соответствие технологического процесса, международным стандартам IPC	

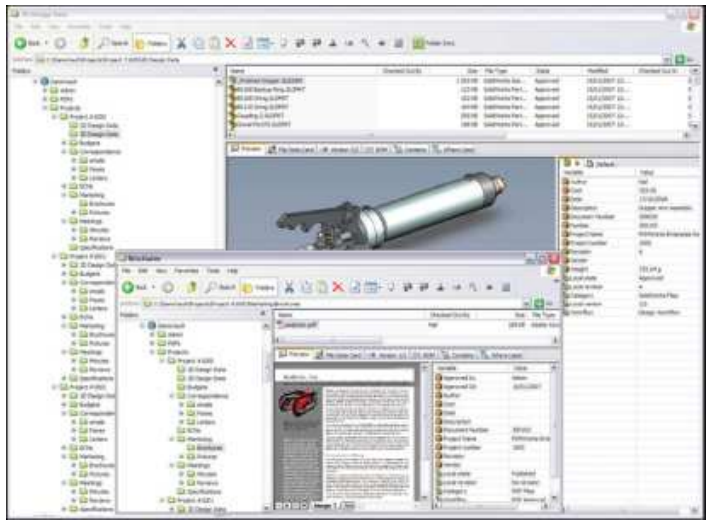
Система управления инженерными данными

Данный компонент ЭАС «МСР-Импульс» структурно входит в блок сбора, обработки и анализа результатов и обеспечивает выполнение следующих задач:

- **организацию файлов продуктов/проектов**
- **согласование и утверждение документов**
- **управление версиями документов, внесение изменений, контроль хода и сроков выполнения работ**
- **выполнение поиска и создание отчетов, создание журнала аудита**
- **защиту при хранении и доступе к документам**
- **поддержку распределенных рабочих групп и удаленных рабочих мест**
- **управление бизнес-процессами предприятия**
- **интеграцию с другими САПР и информационными системами предприятия**

Предлагаемые программные комплексы

SolidWorks Enterprise PDM



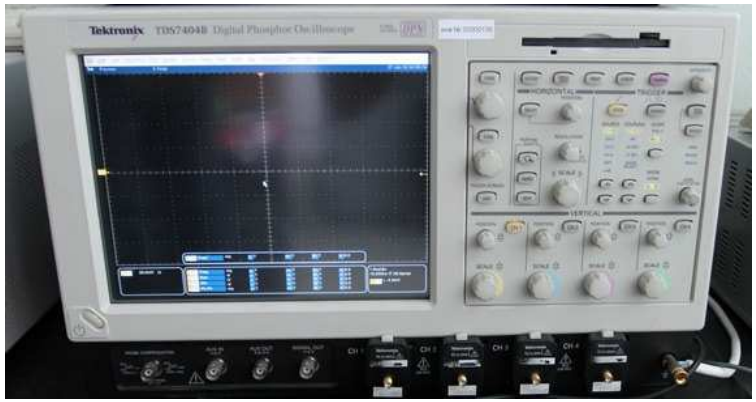
Данный программный комплекс устанавливается на все АРМ ЭАС «МСР-Импульс»

Стенд статических измерений и контрольно-измерительной аппаратуры

Данный компонент ЭАС «МСР-Импульс» включает в себя набор контрольно-измерительного оборудования для проведения статических измерений параметров изготовленных прототипов антенно-фидерных и приемо-передающих модулей импульсных СШП сигналов.

Проверку параметров сигналов модулей во временной области выполняют при помощи **осциллографа**. Для работы с сигналами, имеющими длительности менее 1 нс, необходим высокопроизводительный цифровой осциллограф с эквивалентной скоростью сэмплирования не менее 200,0 ГВыборок/с.

Анализ параметров спектра сигнала проводят при помощи **анализатора спектра**. Для работы с сигналами, имеющими сверхширокий спектр, необходим анализатор спектра с рабочим диапазоном не менее 8,0 ГГц.



Цифровой осциллограф Tektronix TDS7404B

Анализатор спектра Advantest R3265A

Стенд статических измерений и контрольно-измерительной аппаратуры

Для измерения S-параметров, передаточных функций, КСВ, групповой задержки, коэффициента усиления и отражения используется **векторный анализатор цепей**. Для работы с сигналами, имеющими сверхширокий спектр, необходим векторный анализатор цепей с полосой не менее 6,0 ГГц.

Векторный анализатор цепей Anritsu MS4623B

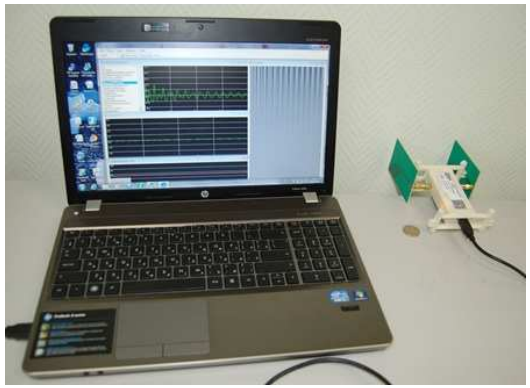
Для излучения и измерения электромагнитного поля, для измерения радиопомех при решении задач электромагнитной совместимости технических средств используется измерительная антенна. Для работы с сигналами, имеющими сверхширокий спектр, необходима **измерительная антенна** с полосой не менее 0,5-3,0 ГГц.

Антенна пассивная логопериодическая П6-68

Стенды динамических измерений и полевых испытаний

Для измерения максимальной дальности действия радиолокационных модулей, для калибровки модулей, для проверки прохождения СШП сигналов через непрозрачные среды проводятся **динамические испытания** приемо-передающих и антенно-фидерных модулей с использованием **комплекса непрозрачных препятствий и системы радиолокационных отражателей.**

Для испытаний приемо-передающих и антенно-фидерных модулей в реальных условиях эксплуатации используется стенд **полевых испытаний**. На данном стенде организуются такие условия испытаний, которые характерны для области применения конкретного тестируемого модуля. Так, например, для испытаний модулей подповерхностной радиолокации могут использоваться площадки определенной глубины с различными типами грунтов. Или для испытаний модулей обнаружения движения человека может использоваться участок леса с кустарником. На стенде полевых испытаний **рекомендуется применение мобильных портативных автономных измерительных приборов**, совмещающих функции анализатора спектра и векторного анализатора цепей и выполненных в защищенном исполнении.



Демонстрация работы ЭАС «МСР-Импульс»

В качестве примера использования ЭАС «МСР-Импульс» проведем **моделирование и контроль характеристик приемо-передающего модуля СШП сигналов** на основе пороговой обработки и параллельной дискретизации сигнала, представляемого в виде двоичных значений в непрерывном времени, без использования тактовой синхронизации.

Этап постановки ТЗ
- определен тип модуля
- выбраны основные характеристики
- назначены исполнители проекта
- поставлены задачи и сроки
- создана структура папок в PDM
- распределены права доступа

Этап математического моделирования
- расчет длительности импульсов 0,3-0,6 нс и диапазона частот 0,5-8,0 ГГц
- расчет энергетических параметров

Этап функционального моделирования
- составление функциональной схемы и расчет основных параметров блоков (максимальная частота повторения импульсов 48,0 МГц, средняя эквивалентная скорость дискретизации не менее 20,0 ГВыборок/с)

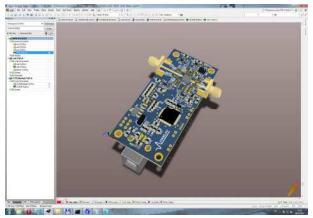
Этап схемотехнического моделирования
- моделирование принципиальной схемы
- разработка топологии многослойной печатной платы
- доработка схемы и топологии печатной платы

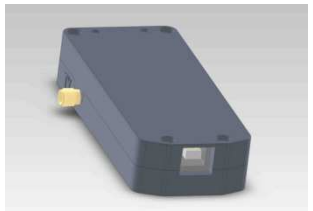
Доработка модуля при неудовлетворительных результатах измерений

Этап проектирования
- разработка 3D-модели печатной платы
- разработка корпуса модуля
- оформление КД и ТД
- доработка КД и ТД

Этап прототипирования
- изготовление печатной платы и корпуса
- монтаж электронных компонентов
- сборка модуля
- сборка 2-го прототипа

Этап контроля и измерений
- контроль параметров длительности и частоты импульсов, спектра сигналов, согласования трактов, дальности излучения, прохождения сигналов





Демонстрация работы ЭАС «МСР-Импульс»

В качестве примера использования ЭАС «МСР-Импульс» проведем **моделирование и контроль характеристик антенно-фидерного модуля СШП сигналов** (рупорной антенны).

Этап постановки ТЗ
- определен тип модуля
- выбраны основные характеристики
- назначены исполнители проекта
- поставлены задачи и сроки
- создана структура папок в PDM
- распределены права доступа

Этап математического моделирования
- расчет диаграммы направленности антенны
- расчет коэффициента усиления антенны

Этап функционального моделирования
- выбор типа антенны, удовлетворяющего основным требованиям
- моделирование основных параметров антенны

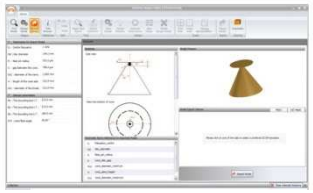
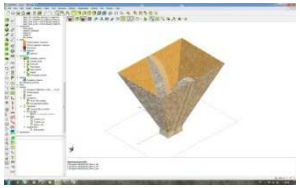
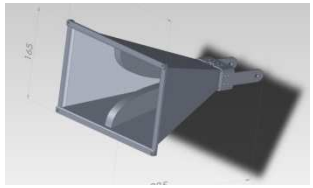
Этап электродинамического моделирования
- моделирование антенны методом конечных элементов (FEM)
- оптимизация модели по коэффициенту стоячей волны в диапазоне частот, диаграмме направленности, коэффициенту усиления

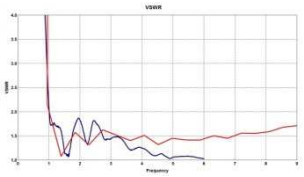
Доработка антенны при неудовлетворительных результатах измерений

Этап проектирования
- разработка 3D-модели антенны и её оптимизация (габариты, масса, технологичность и т.д.)
- оформление КД и ТД
- доработка КД и ТД

Этап прототипирования
- изготовление деталей антенны
- сборка прототипа антенны
- сборка 2-го прототипа антенны

Этап контроля и измерений
- контроль параметров КСВ антенны в диапазоне частот, испытания на дальность излучения, прохождение сигналов

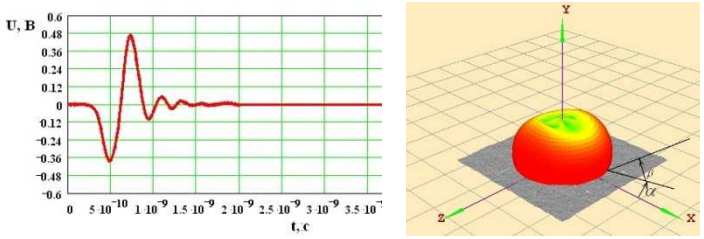


Демонстрация работы ЭАС «МСР-Импульс»

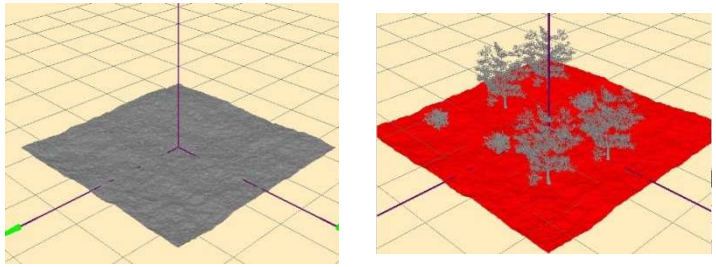
В качестве примера использования ЭАС «МСР-Импульс» проведем **математическое моделирование тракта распространения СШП сигналов** (на базе разработанного совместно с МГТУ им. Н.Э. Баумана отечественного программного комплекса расчета трактов распространения сигналов, адаптированного для СШП сигналов, СШПС-Тракт).

1. **Постановка задачи - расчет отраженных импульсных СШП сигналов от участка леса** (высота РЛС - 1 м, «центр тяжести» спектра частот - 2,5 ГГц, длительность импульса - 0,5 нс, размеры участка леса – 20 х 20 м).
2. **Ввод исходных данных РЛС** - формы импульса, диаграммы направленности антенны.
3. **Ввод параметров модели радиолокационной сцены и тракта распространения** – модели земной поверхности, модели деревьев и кустарника.
4. **Моделирование** на основе использования методов физической оптики, физической теории дифракции, технологии прыгающих лучей (SBR).
5. **Получение результатов** - входного сигнала РЛС, отраженного от заданной радиолокационной сцены с учетом тракта распространения сигналов.

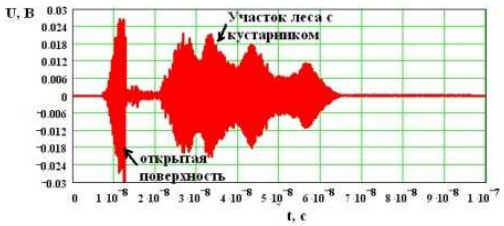
Параметры полученной модели входного сигнала могут быть использованы для создания оптимальных алгоритмов обработки сигнала.



Параметры зондирующего сигнала



Параметры модели радиолокационной сцены



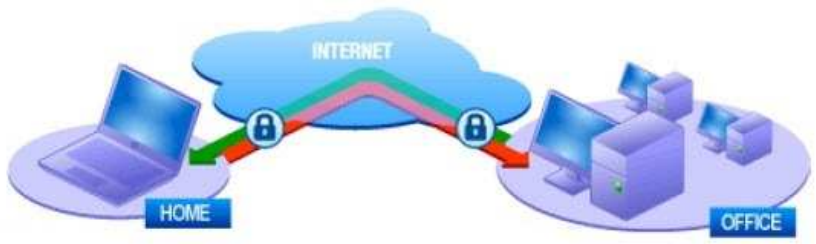
Модель отраженного сигнала

Организация системы удаленного доступа к рабочим местам и вычислительным ресурсам предприятия в ЭАС «МСР-Импульс»

Система удаленного доступа к ресурсам экспертно-аналитической системы обеспечивает доступ к рабочим местам, вычислительным ресурсам, системе электронного документооборота предприятия для возможности работы сотрудников во время командировок, в нерабочее время, контроля за выполнением вычислений, проведения презентаций, контроля за состоянием проекта со стороны заказчиков. Соединение с системой устанавливается с помощью любого компьютера или планшета из любой точки мира по защищенному каналу передачи данных.

Интерфейс программы удаленного доступа прост и интуитивно понятен каждому сотруднику. Программа или приложение для входа в систему максимально адаптированы к любым типам мобильных и стационарных устройств, не требуя никакой дополнительной настройки. Использование протокола TCP/IP позволило осуществлять круглосуточный доступ к ресурсам ЭАС, используя любой стандартный браузер. Соединение устанавливаются через полностью зашифрованные каналы с помощью обмена 1024-битными ключами RSA и 256-битным шифрованием сеанса AES.

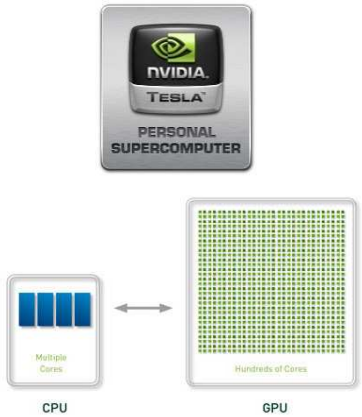
Удаленный доступ к ресурсам ЭАС существенно повышает скорость работы над проектом и мобильность каждого сотрудника, обеспечивая значительное увеличение производительности труда.



Использование сверхпроизводительных вычислителей для ускорения процесса моделирования изделий в ЭАС «МСР-Импульс»

Использование сверхпроизводительных вычислителей (суперкомпьютеров) в составе экспертно-аналитической системы позволяет вывести исследования в области моделирования и расчета антенн, приемо-передающих модулей и других радиоэлектронных изделий на принципиально новый уровень за счет многократного сокращения времени на вычисления и возможности проведения моделирования с параметрами изделий, заданными в широких пределах и с высокой точностью. Ключевыми требованиями к суперкомпьютеру, имеющему возможность массового внедрения на предприятиях, являются наилучшее соотношение цена/производительность и отказоустойчивость.

В качестве суперкомпьютера для экспертно-аналитической системы предлагается использование модели NVIDIA Tesla C2075. В его основных узлах используются решения на базе 8-ядерных процессоров Intel Xeon E5-2690. Также в системе используется платформа с увеличенным объёмом оперативной памяти и рейд-массив из SSD-дисков. В качестве основных в вычислительном процессе используются новейшие графические ускорители Nvidia Tesla 2075.
При использовании суперкомпьютера достигаемое ускорение работы с программными комплексами FEKO составляет в 15 раз, SolidWorks – в 20 раз.



Сравнение количества ядер центрального и графического процессоров