

ПРИМЕНЕНИЕ ГИБРИДНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА ЦЕЛОСТНОСТИ СИГНАЛА ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ВНУТРИСХЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Анил Кумар Панди (Agilent Technologies)

Анализ целостности сигнала в высокоскоростных цифровых устройствах является важной задачей при разработке интегрированных систем. Описаны результаты анализа целостности сигнала для модуля преобразователя интерфейса SATA-USB, полученные для интегрированной системы в диапазоне частот 0...5 ГГц. Показано, что за счет комплексного применения системного, схмотехнического и электромагнитного симуляторов традиционно сложная задача анализа целостности сигнала существенно упрощается. Такой подход дает точные результаты и сокращает время проектирования.

Ключевые слова: гибридное электромагнитное моделирование, высокоскоростные цифровые устройства, целостность сигнала, преобразователь интерфейса.

Целостность сигнала включает два ключевых аспекта высокоскоростных цифровых схем: корректные временные соотношения и качество сигнала. Анализ целостности сигнала нацелен на то, чтобы сигналы достигали точки назначения в неискаженном состоянии. Внутри системы сигналы проходят через множество внутрисхемных соединений (например, от кристалла к выводам корпуса, от выводов корпуса к дорожке печатной платы и от дорожки к разъемам), и на всем пути следования от источника до приемника они подвергаются электрическим воздействиям, которые могут влиять на временные соотношения и качество сигнала. Характеристики разъема непосредственно влияют на характеристики и надежность системы. Таким образом, проектирование и моделирование разъемов для многогигабитных сигналов является одной из самых важных задач в ходе разработки высокоскоростных цифровых систем.

В процессе разработки устройств, использующих высокоскоростные цифровые сигналы, важно учитывать качество передачи сигнала. На гигабитных скоростях внутрисхемные соединения должны оцениваться наравне с проводниками печатной платы, передающими ВЧ сигналы. Постоянно растущие требования к чистоте передаваемого сигнала означают необходимость сохранения высокого качества сигнала при прохождении его через внутрисхемные соединения. Современные многоконтактные разъемы должны обеспечивать передачу данных с очень высокими скоростями (~5 Гбит/с).

Неоценимую помощь здесь может оказать точное моделирование, по результатам которого можно внести изменения в конструкцию на ранних этапах разработки. По этой причине весьма желательно применение точной электромагнитной (ЭМ) модели для всех высокоскоростных внутрисхемных соединений.

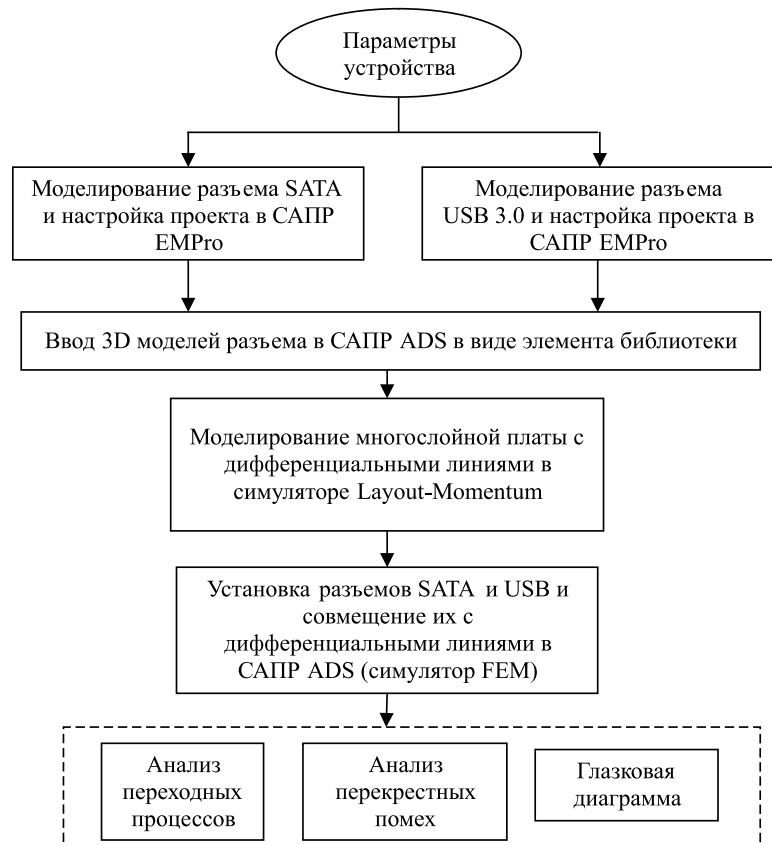
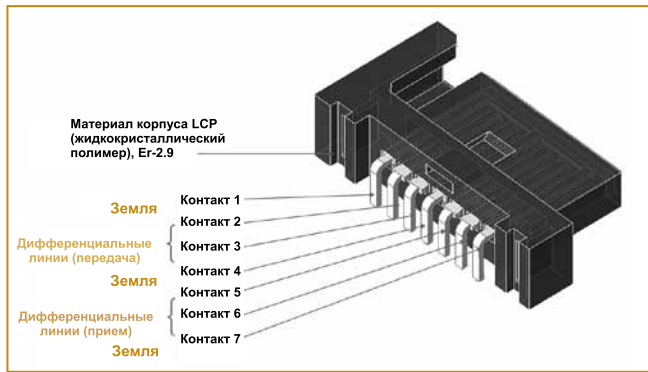
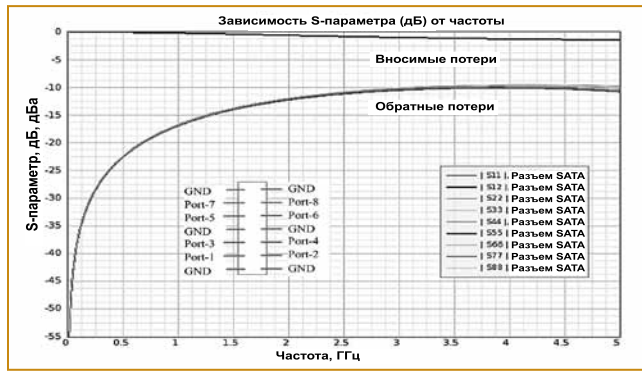


Рис. 1. Структурная схема процесса моделирования модуля преобразователя интерфейса SATA-USB с помощью САПР ADS и EMPro, 3D электромагнитного симулятора, работающего в частотной и временной областях.



(а)



(б)

Рис. 2. 3D модель EMPro и контакты разъема SATA (а) и смоделированные графики обратных и вносимых потерь (б).

Для обеспечения целостности сигнала разработчик должен не только правильно понимать поведение системы, в которой используются разъемы, но и выполнить комплексный анализ целостности сигналов печатной платы вместе с разъемами.

Гибридный подход

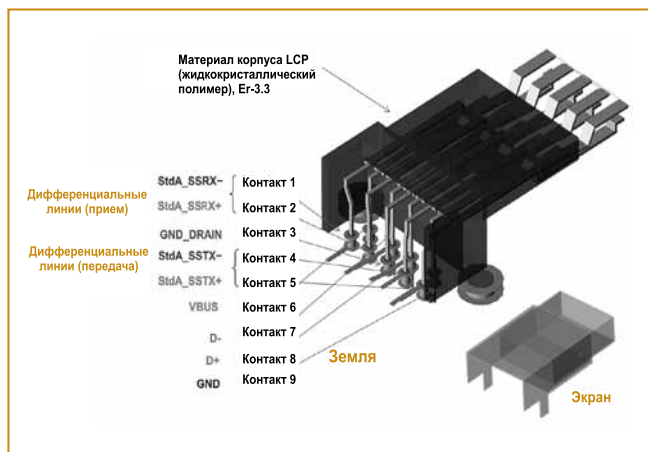
Многолетние исследования привели к появлению множества методов трехмерного (3D) моделирования внутрисхемных соединений, позволяющих повысить плотность интегральных схем и быстродействие высокоскоростных цифровых устройств на многослойных печатных платах. Тем не менее, использование этих методов может привести к появлению перепадов импеданса, которые нарушают целостность сигнала и порождают электромагнитные помехи, если моделирование печатной платы и разъемов выполнялось отдельно.

Один из способов решения этой проблемы заключается в гибридном ЭМ моделировании. При использовании этого подхода разъемы (и другие 3D компоненты) рассматриваются как неотъемлемые составляющие печатной платы и моделируются вместе с ней с применением планарного или 3D ЭМ симулятора, а также симулятора переходных процессов. Планарное моделирование основано на методе моментов (MoM), тогда как 3D ЭМ моделирование использует метод конечных элементов (FEM).

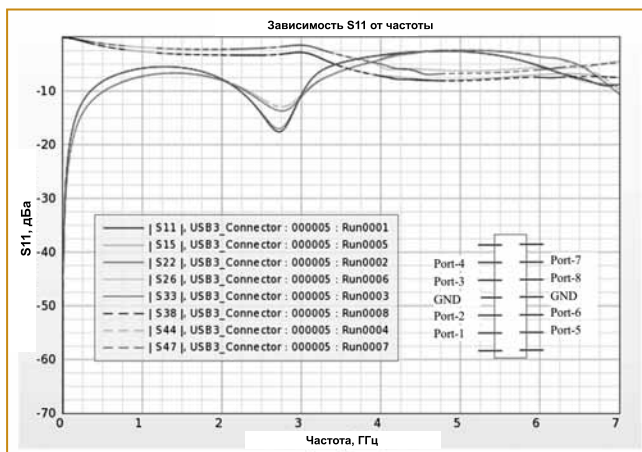
Для лучшего понимания этого гибридного подхода рассмотрим проектирование и анализ модуля преобразователя интерфейса с Serial ATA (SATA) на USB. Сигналы, поступающие с разъема SATA, проходят по двум парам дифференциальных линий и поступают на выходы корпусированной интегрированной системы (ИС). С других выводов ИС сигналы поступают на разъем USB по двум парам дифференциальных линий, проходящих в двух разных слоях платы. Разъемы, корпусированная ИС и печатная плата образуют электрические маршруты, на которых выполняется анализ целостности сигнала. Для описания канала с целью снижения перекрестных помех, отражений и шумов, способных вызвать ложные логические состояния сигнала, используется полноволновой численный анализ 3D высокоскоростных соединений высокой плотности. В таких приложениях основной причиной перепадов импеданса и перекрестных помех в дифференциальных линиях является область соединения разъема с проводниками печатной платы. Для получения точных результатов и исключения подверженных ошибкам трудоемких измерений, нужно учитывать целостность сигнала всей интегрированной системы.

Проектирование и моделирование

Процесс моделирования модуля преобразователя интерфейса SATA-USB показан на рис. 1. В данном



(а)



(б)

Рис. 3. 3D модель EMPro и контакты разъема USB 3.0 (а) и смоделированные графики обратных и вносимых потерь (б).

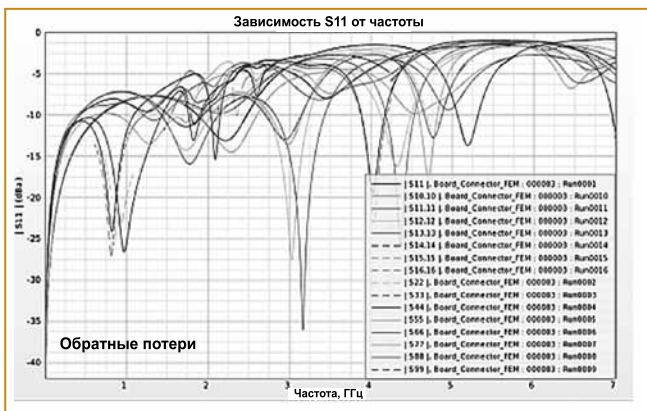
случае для определения характеристик высокоскоростных соединений, включая два разъема и проводники печатной платы, использовались САПР ADS и САПР EMPro.

На первом этапе проектирования два разъема высокоскоростных интерфейсов (SATA и USB3) разрабатывались и моделировались с помощью САПР EMPro. На этой модели анализировались факторы, важные с точки зрения целостности сигнала (например, согласование импеданса, отражение, затухание, задержка распространения, перекрестные помехи и геометрические формы разъемов). Для снижения влияния импеданса форма и расположение контактов разъема были выбраны так, чтобы обеспечить максимально равномерный профиль импеданса. Если разнесения контактов оказывается недостаточным для снижения перекрестных помех, то применяется экранирование.

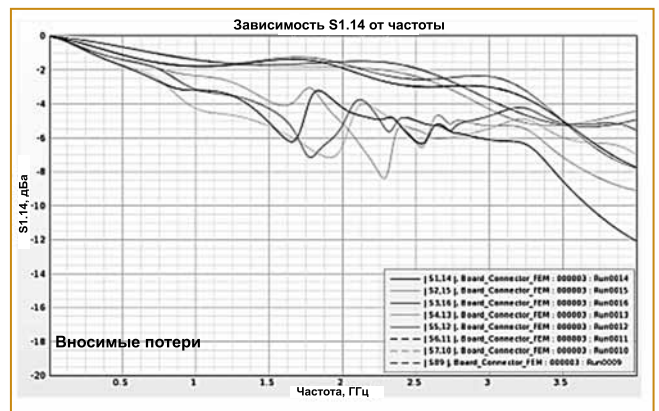
После проектирования разъем импортируется в САПР ADS в виде библиотечного компонента. Затем создается и моделируется в САПР ADS с помощью планарного ЭМ симулятора, использующего метод моментов, многослойная плата для преобразователя интерфейса SATA-USB с дифференциальными линиями, соединенными с выводами ИС. Далее разъемы SATA и USB интегрируются в печатную плату, и выполняется моделирование всей системы в САПР ADS с помощью симулятора FEM. И, наконец, выполняется окончательный анализ целостности сигнала с помощью анализатора переходных процессов для оценки качества сигнала, временных соотношений и перекрестных помех.

Разъемы SATA и USB

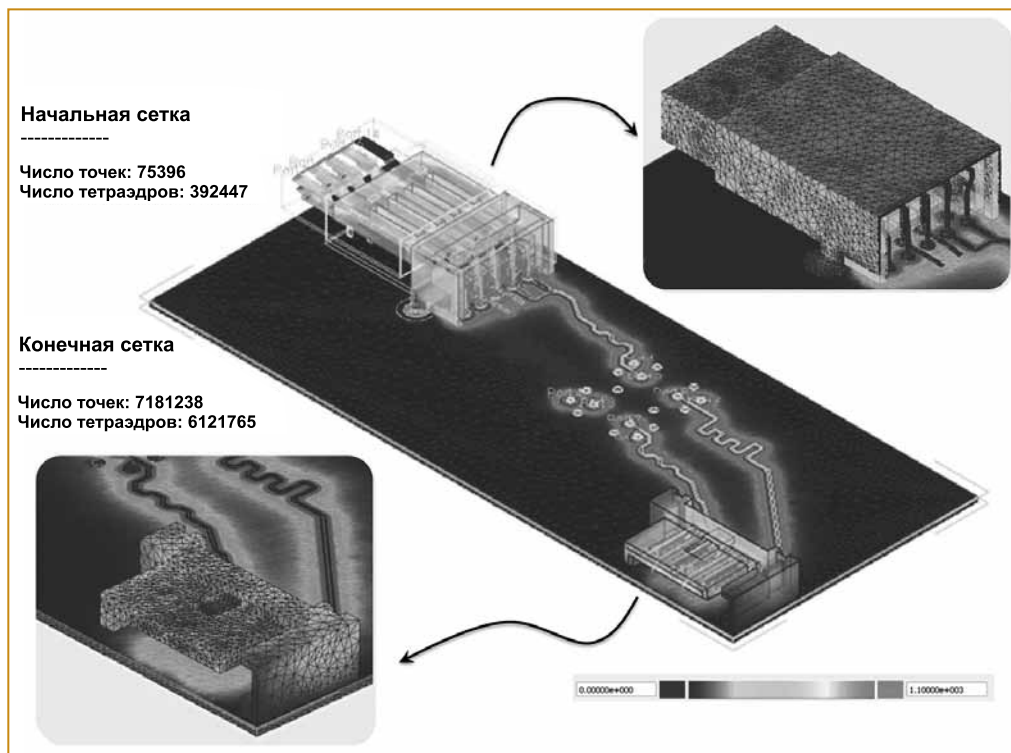
Интерфейс SATA получил широкое распространение благодаря высокой скорости, малому разме-



(a)



(б)



(c)

Рис. 4. Результаты моделирования всей печатной платы: график обратных потерь (а), график вносимых потерь (б) и диаграмма электрического поля всей платы (с).

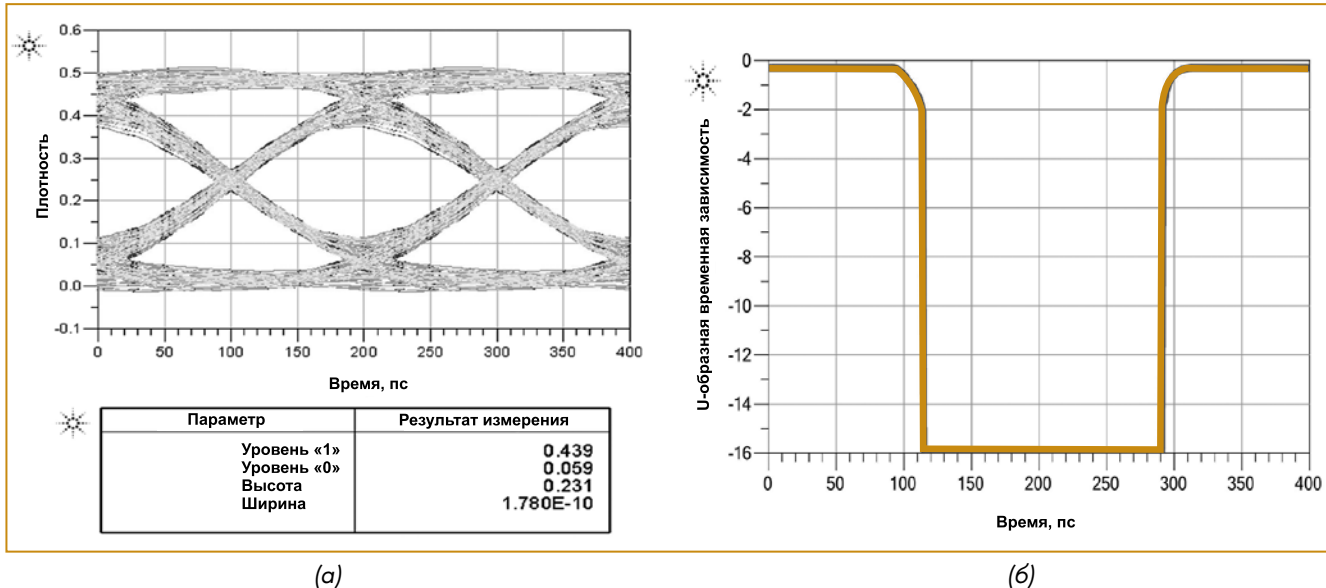


Рис. 5. Результаты моделирования канала, полученные в САПР ADS с одним дифференциальным передатчиком и без учета влияния перекрестных помех. Использовалась предварительно проверенная ЭМ модель платы с разъемами SATA и USB. Система оптимизировалась путем установки конденсаторов между разъемами и дифференциальными линиями для получения наилучшей глазковой диаграммы (а) и U-образной временной зависимости (б).

ру и потенциально меньшей стоимости разработки. При передаче данных на высоких скоростях важным фактором становится целостность сигнала. В связи с высокой скоростью передачи, решающее значение для успешной разработки изделия в целом приобретает успешное проектирование внутрисхемных соединений (например, реализация интерфейса SATA на печатной плате). На гигабитных скоростях такие внутрисхемные соединения должны описываться S-параметрами.

На рис. 2а показана 3D модель и расположение контактов разъема SATA модуля преобразователя интерфейса SATA-USB. Четыре контакта используются для передачи двух пар дифференциальных сигналов. Три контакта являются контактами «земли». Разъем SATA моделировался с помощью симулятора FEM для анализа обратных и вносимых потерь на частотах до 5 ГГц. Результаты моделирования показаны на рис. 2б. Обратите внимание, что обратные потери получились < -10 дБ, а вносимые потери — $< -1,5$ дБ в исследуемом диапазоне.

Интерфейсы USB предназначены для последовательной передачи данных. Для модуля преобразователя интерфейса SATA-USB моделировался стандартный разъем USB 3.0, гарантирующий скорость передачи до 5 Гбит/с, необходимую для сокращения времени передачи данных и снижения потребляемой мощности. Напряжение питания USB 3.0, подаваемое маломощными концентраторами, составляет 4,45...5,25 В.

Модель и расположение контактов разъема USB 3.0 показаны на рис. 3а. Обратите внимание на две пары дифференциальных линий, используемых для передачи и приема сигналов. Как следует из результатов моделирования FEM, показанных на рис. 3б,

обратные потери получились < -7 дБ, а вносимые потери — $< -2,5$ дБ в диапазоне до 3 ГГц.

Анализ целостности сигнала интегрированной системы

После моделирования и оптимизации характеристик разъемов USB и SATA обе модели импортируются в САПР ADS (с результатами моделирования) в виде библиотечных компонентов для анализа целостности сигнала. Разъемы SATA и USB интегрируются как отдельные компоненты в топологию печатной платы, которая объединяет четыре пары дифференциальных каналов, идущих от ИС преобразователя к разъемам.

Вся печатная плата с разъемами SATA и USB моделируется с помощью симулятора FEM, а затем используется в качестве модели для анализа переходных процессов. Вся схема оптимизируется за счет подбора оптимальной геометрии дифференциальных линий — ширины, промежутка между ними и маршрута прокладки — для достижения необходимых характеристик в рабочем диапазоне частот. На рис. 4 показаны обратные и вносимые потери системы для всех портов. В данном случае значения напряженности электрического поля для всей системы могут быть очень полезны при выявлении горячих точек. Эти горячие точки могут быть потенциальными источниками ЭМ излучения, которое вызывает серьезные проблемы электромагнитной совместимости. На рис. 4 в показаны диаграммы электрического поля всей платы, рассчитанные в симуляторе FEM.

Окончательный анализ целостности сигнала

В ходе окончательного анализа целостности сигнала по завершении создания топологии оцениваются качество сигнала, временные соотношения и перекрестные

помехи всей системы (включая разъемы и печатную плату). Вместо отдельных наборов S-параметров разъемов и печатной платы для моделирования канала используется интегрированная печатная плата с разъемами высокоскоростных интерфейсов SATA и USB. Анализ целостности сигнала интегрированной системы дает точные ответы и исключает подверженные ошибкам трудоемкие измерения.

Для анализа целостности сигнала всего канала используется симулятор канала. Симулятор канала учитывает перекрестные помехи, кодирование, частотную компенсацию и другие эффекты, интересующие разработчиков. Компонент Eye Probe выполняет точный анализ параметров глазковой диаграммы, включая тестирование по маске, контуры BER, плотность, ширину и высоту. Вносимые потери в канале зависят в основном от профиля импеданса системы, рассогласования импеданса и от используемых материалов. Перекрестные помехи создаются индуктивной и емкостной связью между путями прохождения сигнала. Результаты моделирования канала показаны на рис. 5.

Заключение

Необходимость проведения анализа целостности сигнала в высокоскоростных цифровых устройствах создает целый ряд проблем, особенно, если используются малогабаритные разъемы с малым шагом контактов (например, SATA и USB). Гибридное ЭМ моделирование, которое позволяет моделировать разъемы и другие компоненты печатной платы в трех измерениях, предлагает удобный способ решения

этих проблем. В статье описаны результаты анализа целостности сигнала для модуля преобразователя интерфейса SATA-USB, полученные для интегрированной системы в диапазоне частот 0...5 ГГц. Глазковая диаграмма и U-образная зависимость были оптимизированы для скорости передачи 5 ГГц с помощью конденсаторов. За счет комплексного применения системного, схмотехнического и ЭМ симуляторов традиционно сложная задача анализа целостности сигнала была существенно упрощена. Такой подход не только дал точные результаты, но и сократил время проектирования. Этот процесс можно легко использовать для анализа целостности сигнала других сложных систем.

Список литературы

1. *Eric Bogatin*. Signal Integrity: Simplified . USA. Prentice Hall PTR. 2003.
2. *Zhang Panke, Pei Changxing, et al.* A Design of a Backplane with High Speed and Huge Capacity Using the Architecture of Front-and-Rear Cross-Link // Electronic Technology, 2004, N10 (на китайском языке).
3. *Kuang Shenqing, Chen Aixin, Su Donglin.* Offset to Minimize the Impact of High Speed Connectors Crosstalk // 7th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory. 2006. N10. p. 1221-1223.
4. *Achim Brenner, Horst F. Nowacki.* A Sensitivity - Analysis on Design Parameters and Tolerances of Signal Integrity of High Speed Data Transfer Connectors // Electrical Contacts. 2002. p. 231-238.
5. *Sucheski M. M., Glover D.W.* High-Density, High Speed, Board-to-Board Stripline Connector // Electronic Components and Technology Conference, 1990. p. 860-864.

*Анил Кумар Панди – инженер-разработчик САИП компании Agilent Technologies.
Контактный телефон: 8 (800) 500-92-86.*

На базе ЦАГИ планируется создание национального исследовательского центра

Думский комитет по промышленности в январе 2014 г. одобрил законопроект "О национальном исследовательском центре "Институт им. Н.Е. Жуковского" и поддержал его принятие. На Центр возлагаются ответственные функции, среди которых прогнозирование научно-технологического развития в области авиастроения и участие в формировании государственной научно-технической политики развития авиационной промышленности, проведение НИР, разработка и научное сопровождение внедрения новых технологий в области авиастроения, подготовка предложений по координации деятельности различных организаций в интересах реализации крупных инновационных проектов, участие в подготовке научных кадров.

ЦАГИ уже сейчас подготовил свое видение перспектив авиации на ближайшее десятилетие, в рамках которого будут развиваться направления, связанные с новыми компоновками самолета, двигателестроением, авионикой. Рассматриваются возможности реали-

зации интересных международных проектов. Среди них - разработка гиперзвукового гражданского аппарата, проект электрического самолета, продвижения технологии создания сеточных силовых конструкций из композитов. Актуальной остается модернизация и развитие авиации для местных воздушных перевозок и легкомоторной авиации.

Уже сейчас Госкорпорация "Ростех" реализует проект по разработке воздушных машин из поликомпозиционных материалов размером 9...19 мест. Производство организовано совместно с австрийскими компаниями по выпуску самолетов авиации общего назначения и мотопланеров. В этой связи особо важной представляется такая цель создания Центра, как использование полученных им научно-технических результатов в интересах развития других секторов экономики страны. Это позволит не только распространить его опыт на отраслевые научные центры, но и станет существенным вкладом в формирование научно-технологического рынка всей нашей промышленности.

<http://www.soyuzmash.ru>