

УДК 621.39

## ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ИНДУКТИВНОСТЕЙ И ТРАНСФОРМАТОРОВ ДЛЯ СИСТЕМ СВЯЗИ ДИАПАЗОНА 60 ГГц

В. Г. Манжула, проректор по учебно-методической и научной работе Института коммуникативных технологий, к.т.н.; manjula@bk.ru

Предложенные в статье топологии на основе кольцевой или цилиндрической геометрии позволяют ослабить выброс электрического заряда на подложку и увеличить такие параметры интегральных элементов как добротность индуктивности и коэффициент передачи трансформатора. Использование известных математических методов при расчете индуктивностей в микрометровом диапазоне геометрических размеров приводит к получению недостоверных и даже отрицательных значений расчетных параметров. Реализованный в статье алгоритм расчета позволяет определить индуктивность плоской токовой спирали с учетом индукции внутри токового кольца.

**Ключевые слова:** индуктивность, топология, интегральная схема, скин-эффект, добротность.

**Введение.** Сегодня диапазон 60 ГГц находит все более широкое применение для построения систем телекоммуникации и связи [1]. Проектирование аппаратуры связи для данного диапазона не обходится без использования интегральных индуктивностей и трансформаторов [2–4]. В свою очередь, парадигма уменьшения геометрических размеров элементов интегральных микросхем породила в микросистемотехнике фундаментальную проблему создания интегральной планарной индуктивности, которая бы в малых геометрических размерах имела приемлемые значения индуктивности.

**Скин-эффект в многоугольной геометрии интегральных индуктивностей и трансформаторов.** Как известно, на частотах свыше 1 ГГц значительное влияние на свойства токопроводящих элементов оказывает скин-эффект. При этом благодаря индукционному взаимодействию различных элементов тока между собой происходит перераспределение плотности тока по поперечному сечению проводника, в результате ток локализуется преимущественно в поверхностном слое проводника.

Толщина скин-слоя у поверхности медного проводника на частоте 60 ГГц приблизительно равна 3 мкм, т.е. в три раза меньше толщины металлизированной дорожки токового покрытия равной 10 мкм.

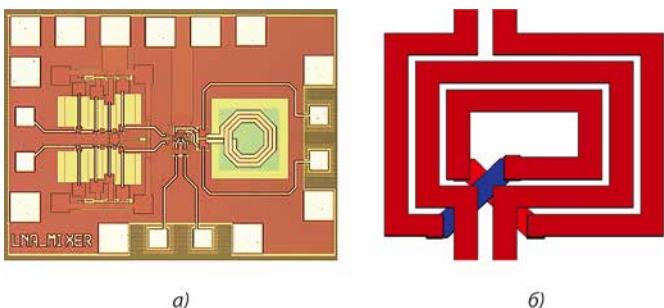


Рис. 1. Примеры интегральных топологий индуктивности (а) и трансформатора (б), используемых фирмой INP GmbH

Современные планарные технологии создания индуктивностей и трансформаторов [5] в частотном диапазоне свыше 10 ГГц используют геометрию квадрата, либо октаэдра (рис. 1). Причина этого заключается в том, что геометрия многоугольников более технологична по сравнению с другими.

Но наряду с достоинствами технология многоугольников обладает одним существенным недостатком — при скачкообразном изменении ориентации токопровода в пространстве скин-эффект создает условия для выбрасывания электрического заряда на подложку. Этот эффект приводит к уменьшению параметра добротности индуктивностей, выполненных по геометрии многоугольников.

**Использование кольцевой и цилиндрической геометрии в интегральных индуктивностях и трансформаторах.** Применение кольцевой или цилиндрической геометрии в планарной технологии позволяет ослабить выброс электрического заряда на подложку и, в свою очередь, увеличить такие параметры как добротность индуктивности и коэффициент передачи трансформатора. Пример топологии индуктивности на основе кольцевой геометрии приведен на рис. 2.



Рис. 2. Топология индуктивности на основе спирали Архимеда

Примеры возможных топологий интегральных трансформаторов на основе колец Гельмгольца представлены на рис. 3. Простейший планарный трансформатор, содержащий первичную и вторичную «обмотки», представляет собой одно кольцо, вложенное в другое (рис. 3, а). При этом возможны следующие варианты:

- первичное кольцо «вход» имеет радиус больше вторичного «выхода» настолько, чтобы оно поместилось в первичное (рис. 3, а). Кольца концентричны;
- радиус вторичного кольца меньше первичного, но его осевое расположение таково, чтобы пересекающий его магнитный поток был наибольшим (рис. 3, б).

Реализация трансформатора с одной первичной «обмоткой» и тремя выходными «обмотками» представлена на рис. 3, в. При построении трансформатора с несколькими входными и одной выходной обмоткой их лучше расположить так, как показано на рис. 3, г. Необходимо иметь

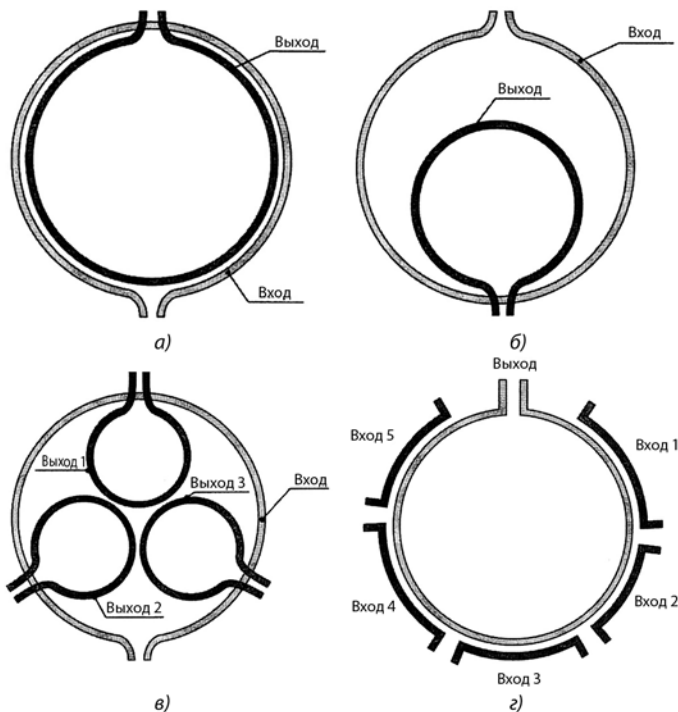


Рис. 3. Примеры возможных топологий интегральных трансформаторов на основе колец Гельмгольца

виду, что принимающие кольца должны быть внутри передающих, а не наоборот. Это связано с тем, что тривиальная замена первичных колец на вторичные не даст нужного потока на выходной «обмотке» в связи с быстрым уменьшением поля вне кольца и сменой его направления по отношению к полю внутри этого же кольца.

**Уточненная модель планарной индуктивности.** Использование известных математических методов при расчете индуктивностей в микрометровом диапазоне геометрических размеров, разработанных П. Л. Калантаровым и А. А. Цейтлиным [6] в 70-х годах прошлого века, приводит к недостоверным и даже отрицательным значениям расчетных параметров.

Обнаруженный недостаток геометрической теории потребовал создания принципиально новых физико-математических моделей, ориентированных на потребности планарной технологии [7–10]. Предлагаемая методика расчета спиральной индуктивности  $L$  высокой симметрии основана на физическом определении данного понятия как коэффициента пропорциональности между потоком  $\Phi$  и током  $i$ , создающим этот поток [11]:

$$\Phi = Li. \tag{1}$$

В современных математических обозначениях закон Био-Савара-Лапласа [11] записывается в виде:

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{d\mathbf{l} \times \mathbf{r}}{r^3}, \tag{2}$$

где  $d\mathbf{B}$  — элементарная магнитная индукция поля, создаваемая элементом проводника с током  $I dl$ ;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м — магнитная постоянная;  $d\mathbf{l}$  — элементарный вектор длины, совпадающий по направлению с током (элемент проводника);  $I$  — сила тока;  $\mathbf{r}$  — радиус-вектор, проведенный от элемента проводника к точке наблюдения  $A$ , в которой определяется магнитная индукция.

Расчет магнитного поля в центре спирали будем проводить, используя закон (2). На рис. 4 показано расположе-

ние векторов задачи. Направление векторов и сами векторы отмечены стрелками. На рис. 4 представлены декартовая и полярная системы координат. Жирная кривая выделяет фрагмент спирали, начинающийся в точке  $(0,0)$ . Вектор  $d\mathbf{l}$ , имеющий две компоненты  $d l_{\parallel}$  и  $d l_{\perp}$ , направлен по касательной к выделенной кривой и совпадает с направлением тока. Вектор  $d\mathbf{l}$  составляет угол  $\alpha$  с направлением радиус-вектора  $\mathbf{r}$ . Вектор  $d\mathbf{l}$  составляет угол  $\alpha_1$  с направлением другого вектора  $\mathbf{r}_1$ . Векторы  $\mathbf{r}$  и  $\mathbf{r}_1$  противоположны друг другу, но равны по модулю.

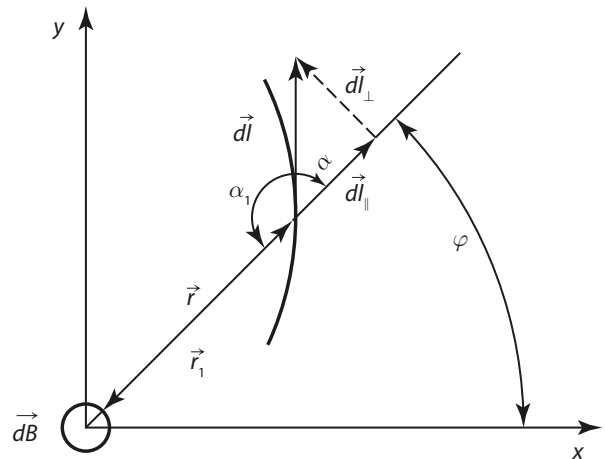


Рис. 4. Направление основных векторов задачи

На плоскости, представленной на рис. 4, закон (2) можно записать в скалярном виде:

$$dB = \frac{\mu_0 I dl \sin \alpha_1}{4\pi r_1^2}. \tag{3}$$

Затем в (3) производят замену

$$dl \sin \alpha_1 = dl \sin \alpha = r d\varphi. \tag{4}$$

Она указывает на то, что поперечная составляющая вектора  $d l_{\perp}$  вносит вклад в формирование индукции магнитного поля в начале координат, а продольная составляющая  $d l_{\parallel}$  — не вносит. Тогда формула для расчета элементарной индукции магнитного поля в центре спирали имеет вид:

$$dB = \frac{\mu_0 I d\varphi}{4\pi r(\varphi)}. \tag{5}$$

Из (5) следует общая формула для расчета индукции в начале координат для любых спиралей, имеющих закон, представленный в полярных координатах  $r = r(\varphi)$ :

$$B = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \frac{\mu_0 I d\varphi}{4\pi r(\varphi)}. \tag{6}$$

Рассчитаем коэффициент увеличения индукции в центре спирали Архимеда. Уравнение спирали Архимеда имеет вид:

$$r = a\varphi, \tag{7}$$

где  $a$  — постоянная. Как известно, спираль Архимеда описывает движение точки, которая имеет две компоненты скорости — постоянную радиальную скорость движения  $v_r$  и постоянную угловую скорость  $\omega$ . Постоянная  $a$  связана с этими переменными соотношением  $a = v_r / \omega$ .

Предположим, что начальное положение спирали Архимеда находится в точке  $r = r_1$  и имеет угол  $\varphi_1 = \pi/2$ .

Это позволяет устранить ситуацию, возникающую в начале координат. Тогда начальный и конечный радиусы, а также начальный и конечный угол спирали связаны соотношением

$$\frac{r_2}{r_1} = \frac{R}{r_1} = 1 + 4N = \frac{\varphi_2}{\varphi_1}, \quad (8)$$

где  $N$  — целое число витков спирали.

Интегрируя в этих пределах выражение (6), получим выражение для коэффициента увеличения индукции поля  $\alpha$ , зависящее только от числа витков  $N$ :

$$\frac{B}{B_*} = \alpha = (1 + 4N) \ln(1 + 4N) / 4, \quad (9)$$

$$\text{где } B_* = \mu_0 I / (2R) \quad (10)$$

— масштаб индукции, создаваемый в центре кольца тем же током.

В табл. 1 представлена зависимость коэффициента увеличения индукции  $\alpha$  и отношения конечного радиуса к начальному  $R/r_1$  от числа витков спирали Архимеда.

**Таблица 1. Зависимость коэффициента увеличения индукции от числа витков спирали Архимеда**

$N$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	20
$\alpha$	4,94	8,33	12,04	15,98	20,12	24,41	28,85	33,40	38,06	89
$R/r_1$	9	13	17	21	25	29	33	37	41	81

Из табл. 1 видно, что возрастание числа витков от 2 до 20 позволяет увеличить индукцию магнитного поля в центре спирали Архимеда от 5 до 90 раз.

Для обобщенных спиралей вида

$$r = a\varphi^n, \quad (11)$$

где  $n$  — любое число кроме единицы. Возможны следующие классы спиралей: отрицательных порядков  $n < 0$  (класс закручивающихся спиралей); дробных положительных порядков  $0 < n < 1$  и положительных порядков  $0 < n < \infty$ . Последние два класса относятся к классу раскручивающихся спиралей.

Подставляя (11) в интеграл (6), для коэффициента увеличения индукции поля получим соотношение:

$$\frac{B}{B_*} = \alpha = \frac{(1 + 4N)^n}{4(1 - n)} [(1 + 4N)^{1-n} - 1]. \quad (12)$$

Связь начальных и конечных переменных имеет вид:

$$\frac{r_2}{r_1} = \left( \frac{\varphi_2}{\varphi_1} \right)^n = (1 + 4\pi N)^n. \quad (13)$$

В табл. 2 представлены зависимости коэффициента увеличения индукции  $\alpha$  в центре обобщенной спирали для разных индексов  $n$ . Первые две строки рассчитаны для  $n = 1/2$ , вторые — для  $n = 3/2$ , а последние две — для  $n = 2$ .

Из табл. 2 видно, что наиболее перспективными являются раскручивающиеся спирали с показателем  $n > 1$ . Для рассчитанных значений полученные коэффициенты увеличения индукции для одного и того же числа витков  $N$  всегда больше, чем у спирали Архимеда. Но, с другой стороны, большие коэффициенты  $\alpha$  можно получить только путем увеличения эффективной площади, занимаемой обобщенной спиралью.

**Таблица 2. Зависимость коэффициента увеличения индукции от числа витков обобщенных спиралей для разных  $n$**

$N$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	20
$\alpha(n_1)$	3,0	4,7	6,5	8,2	10,0	11,8	13,6	15,5	17,3	36,0
$R/r_1$	3,0	3,6	4,1	4,6	5,0	5,4	5,7	6,1	9,0	27,0
$\alpha(n_2)$	9,0	16,9	26,5	37,6	50,0	63,6	78,3	94,0	110	324
$R/r_1$	27	46,9	70,0	96,2	125	156	190	225	262	729
$\alpha(n_3)$	18	39	68	105	150	203	264	333	410	1620
$R/r_1$	81	169	289	441	625	841	1089	1369	1681	6561

Считая, что среднее значение потоков индукции в кольце и спирали можно рассчитывать по значениям индукции в центре, получим оценочное соотношение для коэффициента увеличения индуктивности, которое совпадает с коэффициентом увеличения индукции

$$L = \alpha L_*, \quad (14)$$

где масштаб индуктивности

$$L_* = \mu_0 \pi R / 2. \quad (15)$$

Проведем оценку для  $N = 10$  витков спиральной индуктивности, начальный радиус которой 10 мкм. Для спирали Архимеда конечный радиус — 410 мкм (см. табл. 1), масштаб индуктивности — 0,81 нГн. Индуктивность увеличивается почти в 40 раз до значений 30,8 нГн.

**Заключение.** Реализованный алгоритм расчета индуктивности плоской токовой спирали предполагает выполнение следующих операций:

- расчет магнитного поля  $B$  в центре кольца по заданному току в кольце радиусом  $R$ ;
- размещение в этом кольце спирали с заданным законом зависимости  $r = r(\varphi)$  в полярных координатах. Спираль ограничена по числу витков  $N$  следующими переменными: начальным значением угла  $\varphi_1$  и радиусом  $r_1$ ; конечным значением угла  $\varphi_2$  и радиусом  $r_2 = R$ , совпадающим с радиусом кольца;
- вычисление по закону Био-Савара-Лапласа нового значения индукции магнитного поля  $B$ , создаваемого ограниченной планарной спиралью в центре кольца;
- расчет коэффициента увеличения индукции магнитного поля  $\alpha = B/B_*$  и нахождение связи значения индуктивности, формируемого спиралью, с коэффициентом увеличения индукции  $\alpha$ .

*Основные научные и практические результаты, изложенные в данной статье, получены при выполнении в 2012–2013 гг. гранта № 12–08–00654-а Российского фонда фундаментальных исследований «Теоретические основы проектирования интегральных индуктивностей для сложных функциональных блоков и IP-модулей систем связи и телекоммуникаций нового поколения».*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Grass E., Tittelbach-Helmrich K., Choi Ch.-S. et al. Communication Systems Operating in the 60 GHz ISM Band: Overview // EuMA International Journal of Microwave and Wireless technologies.— 2011.— № 3.— P. 89–103.
2. Будяков А. С., Прокопенко Н. Н., Манжула В. Г. Анализ частотных характеристик входных каскадов СВЧ операционных усилителей для сложных функциональных блоков радиационно-стойкой аппаратуры // Науч.-техн. ведомости



- С.-Петербургского государ. политехн. ун-та. Информатика. Телекоммуникации. Управление.— 2010.— Т. 3.— № 101.— С. 207–211.
3. Манжула В.Г. Информационная поддержка синтеза схемотехнически интегрированных принципиальных электрических схем // Науч.-техн. ведомости С.-Петербургского государ. политехн. ун-та. Информатика. Телекоммуникации. Управление.— 2012.— Т. 2.— № 145.— С. 144–150.
  4. Манжула В.Г. Оценка интегральной избыточности в процессе синтеза микросистемных систем // Современные проблемы науки и образования.— 2011.— № 4.— С.33.
  5. Glisic S., Scheytt J.C., Sun Y. et al. Fully integrated 60 GHz transceiver in SiGe BiCMOS, RF modules, and 3.6 GBit/s OFDM data transmission // EuMA International Journal of Microwave and Wireless technologies.— 2011.— № 3 (2) .— P. 139–146.
  6. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей: справочная книга.— Л.: Энергоатомиздат, 1986.— 488 с.
  7. Сапогин В.Г., Прокопенко Н.Н., Марчук В.И., Манжула В.Г. Погонная индуктивность цилиндрических проводников с аксиальной плотностью тока в сложных функциональных блоках // Инженерный вестник Дона.— 2012.— Т. 22.— № 4–1 (22) .— С. 79.
  8. Сапогин В.Г., Прокопенко Н.Н., Манжула В.Г. и др. Индуктивность сплошного проводящего цилиндра с азимутальной плотностью вихревого тока в низкочастотной области // Фундаментальные исследования.— 2013.— № 11–3.— С. 441–446.
  9. Сапогин В.Г., Прокопенко Н.Н., Марчук В.И. и др. Индуктивные свойства микроскопического проводящего кольца с плотностью вихревого тока азимутального направления // Нано- и микросистемная техника.— 2014.— № 1.— С. 22–26.
  10. Сапогин В.Г., Манжула В.Г. Управление погонной индуктивностью коаксиального кабеля с аксиальной плотностью токов // Фундаментальные исследования.— 2014.— № 5–5.— С. 984–989.
  11. Матвеев А.Н. Электричество и магнетизм.— М.: Высшая школа, 1983.— 463 с.

Получено 20.05.14.

## ИНФОРМАЦИЯ

### ИТОГИ КОНФЕРЕНЦИИ РЕГИОНАЛЬНОГО ОТДЕЛЕНИЯ РАЕН ПО ПРОБЛЕМАМ МОБИЛЬНОГО БИЗНЕСА

**XXXV Международная конференция «Мобильный бизнес: перспективы и проблемы развития в России и за рубежом» состоялась в конце 2014 г. в г. Санья (Китай). Конференция организована Региональным отделением РАЕН «Экономика и качество систем связи», Общественным научно-техническим советом по проблемам развития подвижной радиосвязи и ЗАО «НИРИТ» при участии специалистов ведущих компаний и институтов отрасли.**

На открытии конференции его участников приветствовал генеральный директор ЗАО «Национальный институт радио и инфокоммуникационных технологий», профессор МТУСИ, д.т.н. **О.А. Шорин**. В своем выступлении он остановился на основных перспективах развития телекоммуникационного рынка и сетей мобильного широкополосного доступа.

Работа конференции проходила в трех секциях. Выступая с докладом на секции «**Вопросы создания и функционирования перспективных технологий подвижной радиосвязи**», О.А. Шорин отметил, что эксплуатируемые сегодня сотовые сети общего пользования (GSM, CDMA, 3G), предназначенные в первую очередь для передачи голоса или данных по протоколу TCP-IP, не могут обеспечить всего комплекса сервисов, необходимых корпоративным пользователям.

Строящиеся сети LTE также не позволяют эффективно реализовать ряд беспроводных сервисов для многопользовательских телематических систем, используемых корпоративными клиентами. Кроме того, на рынке нет защищенных устройств для поддержки профессиональных сервисов на базе LTE. Приемлемое качество для коммуникаций экстренных служб ожидается не ранее 2019–2020 гг.

На фоне этого продвигаемый стандарт McWill обеспечивает: стабильное качество и высокую скорость передачи данных; реализацию любых классов телематических сервисов; организацию приоритетов обслуживания, организацию VPN-сервисов и ряд других возможностей, важных для современных корпоративных и специальных сетей, интегрирующих голосовые и все виды сервисов передачи данных и телематики в фиксированном и мобильном режимах. Среди потенциальных пользователей сетей стандарта McWill можно назвать Газпром, Россети, РЖД, МВД, Ростехнологии, Роснефть, МЧС.

Главный инженер ЗАО «НИРИТ», к.т.н. **В.Н. Акимов** раскрыл особенности двухуровневой архитектуры структуры ядра сети McWill и представил информацию о каждой из подсистем. Аспиранты МТУСИ (**Р.С. Аверьянов, А.О. Шорин**) представили результаты научных исследований уровня интерференций для сигналов с OFDM-модуляцией, определения оптимальных параметров OFDM-сигналов с учетом мобильности абонентов, сравнительного анализа условий работы стандартов LTE и McWill.

Доклад заместителя директора ИПК МТУСИ, к.т.н. **М.С. Лохвицкого** был посвящен теоретическим вопросам адаптивного приема сигналов, алгоритмам оптимального приема сигнала и обучающим последовательностям в сотовой связи.

Технический директор ЗАО «Национальное радиотехническое бюро» («НРТБ»), к.т.н. **В.Г. Калугин** предложил пути повышения эффективности использования радиочастотного ресурса, выделенного для строительства сетей LTE на территории РФ. Директор департамента информационных техноло-

гий ЗАО «НРТБ» **Ю.В. Тваровский** рассказал о проекте использования автоматизированной управляющей системы для повышения эффективности выполнения работ по обеспечению радиочастотного ресурса.

На секции «**Метрология, стандартизация и измерения в инфокоммуникациях**» были рассмотрены вопросы метрологического обеспечения перспективных мобильных сетей. Заведующий кафедрой метрологии, стандартизации и измерений в инфокоммуникациях, д.т.н. **Б.П. Хромой** дал характеристику средствам метрологического обеспечения сотовых систем LTE и WiMax: средствам измерения мощности электромагнитных колебаний, шумовых характеристик и параметров цепей с распределенными постоянными.

На секции «**Регуляторные и экономические аспекты создания и развития систем подвижной радиосвязи и телерадиовещания**» профессор кафедры экономики связи МТУСИ, к.э.н. **Е.Е. Володина** представила результаты анализа экономико-правовых основ гражданского оборота прав на пользование радиочастотным спектром за рубежом и возможностей распространения такой практики в России. Была предложена модель нового правового режима использования радиочастотного ресурса, разработанного с учетом особенностей российского законодательства и рыночных условий.

В рамках работы конференции было проведено очередное заседание Регионального отделения РАЕН «**Экономика и качество систем связи**», на котором члены правления решили ряд организационных вопросов, наметили пути скорейшей реализации инновационных предложений и проектов. Принято итоговое решение о продолжении совместной научно-практической деятельности.