

ЭЛЕКТРОНИКА
И РАДИОТЕХНИКА

УДК 621.375.4

КОНЦЕПЦИЯ ОБЪЕДИНИТЕЛЯ ВЫСОКОЙ МОЩНОСТИ НА
ОСНОВЕ ПРЯМОУГОЛЬНОГО ВОЛНОВОДА¹

© 2024 г. Ю. Ю. Лозеев^{а,***}, Т. А. Лозеева^{а,*}, Г. Б. Шарков^а,

А. А. Морозов^а

^аНациональный исследовательский ядерный университет “МИФИ”

Россия, 115409, Москва, Каширское ш., 31

**e-mail: talozeeva@mephi.ru*

***e-mail: yylozeev@mephi.ru*

Поступила в редакцию 10.01.2024 г.

После доработки 06.03.2024 г.

Принята к публикации 01.04.2024 г.

Обсуждается концепция объединителя 16:1 непрерывной высокочастотной мощности 500 кВт на частоте 500 МГц на основе прямоугольного волновода WR1800 и его прототип 4:1. Объединитель работает при 32 кВт непрерывной мощности, поданной на каждый из входов и оснащен водяной системой охлаждения антенн. Охлаждение реализовано через закороченный сегмент коаксиальной линии, ВЧ мощность подводится через боковую линию. Представлены результаты исследований характеристик и особенностей объединителя мощности 16:1 и его прототипа 4:1.

1. ВВЕДЕНИЕ

Твердотельные усилители в последнее время претендуют на статус достойной и современной замены электровакуумных приборов субмегаваттной мощности. Обычно твердотельные усилители проектируются модульными и масштабируемыми – состоят из отдельных блоков – усилительных модулей на основе одного или нескольких ВЧ-

¹ Материалы 28 конференции по ускорителям заряженных частиц “RuPAC23”, Новосибирск.

транзисторов. Транзисторы способны генерировать мощность в диапазоне частот от единиц МГц до единиц ГГц, а их коэффициент усиления зависит от выбранной частоты, однако выходная мощность обычно не превышает 4 кВт в импульсном режиме. Для получения более высоких порядков мощности обычно используются разнообразные объединители мощности. К примеру, планарные объединители Уилкинсона или Гизеля могут использоваться в качестве первой ступени объединения для суммирования мощности с нескольких транзисторов внутри модуля. Для получения десятков и сотен кВт мощности используются объединители пространственного типа – волноводные или резонаторные.

Основным потребителем субмегаваттных мощностей в мегагерцовом диапазоне являются ускорители заряженных частиц. Разработчики ускоряющих структур зачастую вынуждены подстраиваться под характеристики существующих усилителей при разработке концепции ускорителей. Один из таких случаев – новая Супер Чарм-Тау фабрика на базе НЦФМ (Сатис, Россия), где разработчики планировали перейти от проектной частоты 500 МГц на доступную 350 МГц [2, 3]. И хотя возможно произвести усилитель на 500 МГц, работа на больших мощностях существенно усложняет задачу. В данной статье рассмотрена концепция твердотельного усилителя, способного производить 500 кВт непрерывной ВЧ-мощности на частоте 500 МГц и объединителя высокой мощности для такого усилителя.

2. СУБМЕГАВАТТНЫЙ ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ УСИЛИТЕЛЬ

ВЧ-транзисторы, работающие на частоте 500 МГц, способны производить около 1 кВт непрерывной мощности [4, 5], так что для получения 500 кВт выходной мощности потребуется свыше 500 транзисторов. Такие транзисторы обычно собираются в усилительные модули, которые являются самостоятельной независимой ячейкой с элементами контроля и управления. Для получения более высокой мощности усиленные сигналы с транзисторов необходимо суммировать. Проще всего было бы осуществить суммирование в одну ступень при помощи использования объединителя резонаторного типа или объединителей на основе коаксиальных или радиальных линий. В радиальных и коаксиальных объединителях вводы мощности расположены на периферии устройства, так что объединитель с количеством входов свыше 500 будет довольно громоздким. В качестве резонаторных объединителей чаще всего используются резонаторы на виде колебаний H₀₁₀– такой вид колебаний не обладает вариацией поля по высоте или азимуту и позволяет равномерно разместить петли связи на обечайке резонатора. Чтобы возбудить в резонаторе моду H₀₁₀ на частоте 500 МГц резонатор

должен обладать радиусом 229 мм и высотой около 400 мм (рис.1). В предположении, что мощность вводится в резонатор по волноводам номинала DIN 7/16”, поверхность резонатора позволяет разместить около 100 входов и получить выходную мощность около 100–200 кВт. Чтобы получить большую мощность необходимо увеличивать размер резонатора и работать на другом виде колебаний что влечет за собой другое, если вообще возможное, распределение вводов мощности.

Другой способ объединения – использование каскада из объединителей 2:1 на основе кольцевых и волноводных мостов. Такой способ влечет за собой увеличение размеров и потери порядка нескольких процентов мощности на объединительном “дереве”. Кроме того, если один из усилительных модулей, подключенных к плечам объединителя 2:1, по какой-то причине выходит из строя, мощность оставшегося модуля распределяется между плечами объединителя и практически целиком уходит в рассогласованный неработающий модуль.

Оставшийся способ – использование объединителей на основе волноводов с расстоянием между входами, кратным длине волны или половине длины волны, что для свыше 500 входов также не представляется целесообразным. Поэтому потребуется как минимум две ступени объединения (рис.2). В качестве первой ступени объединения предлагается использовать коаксиальный объединитель прямоугольного сечения типа представленного в работе [6]. В качестве второй ступени предлагается использовать объединитель на основе прямоугольного волновода WR1800.

Рис. 2. Концепция субмегаваттного усилителя мощности

3. КОНЦЕПЦИЯ ОБЪЕДИНИТЕЛЯ 16:1

Концепции объединителя на основе прямоугольного волновода WR1800, способного работать с входной мощности 32 кВт и выходной 500 кВт, представлены на рис.3.

Рис. 3. Концепции волноводного объединителя ВЧ мощности

Поскольку объединитель должен работать в непрерывном режиме, даже десятые доли процента потерь мощности приведут к значительному нагреву элементов объединителя. Поэтому, какими бы ни были элементы связи с волноводом, необходимо их активное водяное охлаждение. Во время разработки рассматривались два варианта элементов связи – петли связи и антенны связи. Обе версии предполагали размещение элементов связи на расстоянии

длины волны друг от друга на широкой или узкой стенке волновода WR1800 с одним закороченным концом и другим концом, подключенным к устройству ввода мощности в резонатор.

Версия с петлями связи была предпочтительнее в начале разработки благодаря огромному опыту, накопленному при разработке охлаждения петель ввода мощности в резонаторы и отсутствию необходимости работать в области высокого электрического поля. Настройка коэффициентов передачи по петле осуществлялась вращением петли, а согласование петель проводилось с помощью согласующих линий, установленных на каждом входе. Такая система, однако, оказалась экстремально чувствительной к допускам на изготовление петли и сложной в настройке. Достаточно большие петли и вносимая ими внушительная индуктивная нагрузка изменяли длину волны в прямоугольном волноводе и еще сильнее усложняли настройку. Кроме того, для настройки объединителя необходимо вращать петлю с точностью в 1 градус, что существенно усложняет ручную настройку. Поэтому выбор был сделан в пользу антенной связи, которая лишена этого недостатка. Подобный объединитель с емкостной связью был спроектирован командой из Университета Уппсалы для ESS [7], однако вопрос об охлаждении антенн поднимался лишь теоретически. Концепция узла ввода мощности с системой охлаждения, сходной с представленной в работе [1], представлена на рис.4.

Рис. 4. Антенный узел с водяным охлаждением

ВЧ-мощность подается в волновод WR1800 через боковую линию импеданса 50 Ом и номинала EIA 4 1/2", поток воды подается в полость антенны через дополнительный закороченный отрезок линии передачи с импедансом, отличным от 50 Ом для согласования входа с волноводом. Основными местами нагрева будут наконечники антенн, имеющие наибольшую плотность тока на поверхности. Объединитель планируется изготовить полностью медным, кроме частей, имеющих контакт с водой. Расчетные потери мощности в объединителе составляют 625 Вт, что, с учетом предыдущего опыта работы с медными объединителями, обещает реальные потери около 3 кВт из-за окисления меди и потерь на соединениях. К примеру, более дешевый и доступный алюминиевый объединитель рассеивает около 13 кВт ВЧ-мощности, что ведет к большей температуре антенн и большей нагрузке на транзисторы для компенсации рассеянной мощности.

Объединитель, который так же можно рассматривать как распределитель мощности с точки зрения S-параметров, настроен на малое значение возвратных потерь (рис.5) и имеет

хорошие фазовый и амплитудный балансы – коэффициент передачи колеблется в диапазоне 0.05 дБ, а разность фаз коэффициента передачи по плечам не превышает одного градуса.

Рис. 5. S-параметры объединителя 16:1 в диапазоне частот 498–502 МГц

Сигнал подается на каждую пару входов в противофазе. Это означает, что один из объединителей промежуточного звена внутри стойки будет генерировать сигнал, сдвинутый на 180 градусов относительно второго объединителя в стойке. Полоса объединителя – около 50 МГц по уровню -3 дБ от рабочего уровня S_{n1} . Также стоит отметить, что система из двух объединителей – промежуточного и финального – обладает свойством фильтровать высшие гармоники несущей частоты (рис. 6) в диапазоне от 0 до 3.5 ГГц, возникающие при работе усилительного модуля. Такая особенность дает дополнительное преимущество по сравнению с электровакуумными приборами и другими типами объединителей мощности.

Рис. 6. Амплитуда выходного сигнала в диапазоне частот 0–3.5 ГГц

Поскольку антенны находятся области максимумов электрического поля, необходимо контролировать пиковые поля в объединителе. Пиковые поля на уровне мощности 500 кВт не превышают 0.56 МВ/м и традиционного предела напряженности пробоя для сухого воздуха 3 МВ/м.

4. ПРОТОТИП ОБЪЕДИНИТЕЛЯ МОЩНОСТИ 4:1

Для проверки характеристик основных узлов объединителя был разработан прототип объединителя 4:1. Небольшая модификация штыря ввода и добавление дополнительной линии согласования являются единственными изменениями конструкции антенны объединителя (рис. 7, 8).

Рис. 7. Узел ввода мощности прототипа объединителя 4:1

Рис. 8. S-параметры прототипа объединителя 4:1.

Для прототипа 4:1 был разработан выход на коаксиальную линию 4+1/2 типа “дверная ручка”. Переход с типа 4+1/2 на N-тип будет использоваться для измерения S-параметров, а для измерений на мощности выход будет подключаться через направленный ответвитель на эквивалентную нагрузку со входом 4+1/2. Предполагается испытывать прототип объединителя в трех режимах: мощность 10 дБм подается на выход для измерения S-

параметров; 2.5 кВт – на каждый вход от отдельных усилительных модулей; 10 кВт – на каждый вход от сборок из 4 модулей. Как показали тепловые расчеты, режим работы с мощностью 2.5 кВт на входах не требует активного охлаждения, так как с учетом естественной конвекции воздуха концы антенн нагреваются только лишь до температуры 67°C, что является нормальной рабочей температурой для меди (рис. 9).

Рис. 9. Результаты численного моделирования нагрева прототипа 4:1

Режим работы с мощностью 10 кВт на каждом входе потребует подачи воды с давлением 5 бар для удержания температуры в рамках 50–60°C. Водяное охлаждение подается на внутреннюю трубку контура охлаждения, а выводится по внешней стенке этой трубки (рис. 4). Нижняя часть контура оптимизирована в виде конуса для увеличения потока воды и передачи тепла, которая ухудшается при использовании плоской формы нижней части (рис. 10).

Рис. 10. Распределение скорости потока воды в узле охлаждения прототипа 4:1

Настройка изготовленного объединителя будет происходить дискретно с помощью полиэтиленовых или РОМ вставок в форме полуколец различных размеров (рис. 11). Также эти вставки служат в качестве поддерживающих и центрующих элементов конструкции антенны. Меняя длину диэлектрической вставки с шагом от 5 мм, можно настраивать коэффициенты отражения (рис. 12) и коэффициенты прохождения мощности S_{n1} с точностью до десятых долей дБ.

Рис. 11. Подстроечные элементы объединителя

Рис. 12. Импедансная характеристика прототипа объединителя при варьировании длины диэлектрических вставок

Неопределенность в выборе материала вставок обусловлена, помимо их диэлектрических свойств, механическими соображениями. Фторопласт обладает значительно более низким коэффициентом диэлектрической проницаемости, поэтому вставки из него позволяют проводить более точную подстройку импеданса. При этом, однако, с точки зрения конструктивных характеристик, фторопласт является материалом, из которого затруднительно производство деталей с точно выдержанными размерами и геометрией. Кроме того, на этапе первичной настройки установки неизбежны многократные разборки антенн и замены вставок, при которых существенными факторами риска являются “срабатывание” материала по посадочному диаметру и накопление случайных дефектов поверхности из-за малой твердости материала. Такое накопление дефектов способно привести к потере точности

внешней геометрии вставок, в результате чего они не смогут обеспечить необходимую соосность антенн.

5. КОНСТРУКЦИЯ ПРОТОТИПА 4:1

С точки зрения конструкции, прототип состоит из 4 основных подборок: основного корпуса волновода с присоединительными интерфейсами; согласующего элемента;борок антенн; входных линий с концевыми ВЧ-вводами.

Основной корпус волновода выполнен в виде прямоугольного параллелепипеда из листовой меди М1т толщиной 3 мм, соединенных лазерной сваркой. К отверстиям в боковых пластинах корпуса привариваются специальные посадочные фланцы из меди для последующего присоединения входных и выходного волноводов, а также согласующего элемента. Для компенсации коробления из-за деформации, вызываемой снятием внутренних напряжений при резке холоднокатаного листа, а также собственных напряжений из-за неравномерности нагрева при сварке, пластины усиливаются ребрами жесткости в местах присоединения фланцев. Окончательная сварка корпуса проводится с оснасткой, ключевым элементом которой является калибровочная труба, размещаемая во входных волноводах (со снятыми антеннами и фланцами) для сборки по ней волноводов на корпусе с необходимой степенью точности.

Согласующий элемент представляет из себя Т-образную сборку из соосных медных труб внешними диаметрами $\varnothing 230$ и $\varnothing 106$, соединенных друг с другом через набор медных соединительных элементов (пластин и втулок). Труба с большим диаметром насаживается на фланец в основном корпусе с последующим припаиванием его с применением серебряного припоя. Труба меньшего диаметра заглушена крышкой с резьбовым отверстием для обеспечения электрического контакта центрального элемента ВЧ-разъема выходного волновода с корпусом.

Входные линии представляют из себя разборную конструкцию, состоящую из корпуса входной линии хомута, центрального волновода и фланца. Корпус входной линии выполнен в виде сборки Г-образной формы из труб: малый вертикальный патрубок посредством лазерной сварки присоединяется к большому; в малый патрубок вставляется посадочная втулка, на которую устанавливается отрезок трубы с встроенным входным ВЧ-разъемом после чего обжимается хомутом. Центральный волновод представляет из себя медную трубу с ответной частью для ВЧ-разъема с одной стороны и коническим элементом с другой стороны. Конический элемент вставляется в ответную часть, распаянную на антенне, и прикручивается

к ней центральным винтом с контролируемым усилием затяжки. Такая конфигурация обеспечивает возможность сравнительно простого и быстрого монтажа центральной антенны при подборе и замене диэлектрических вставок. К фланцу прикрепляется винтами антенна, а также на фланце расположены фитинги системы водяного охлаждения антенны. В конце сборки фланец закрывает основной корпус волновода с внешней стороны.

Готовыми компонентами конструкции являются ВЧ-разъемы и трубы волноводов производства COM-TECH серии Rigidline: COM-TECH D-PC130P, D-IC103Q и D-RL103O соответственно. Их выбор обусловлен необходимостью использования доступных стандартных компонентов, наилучшим образом соответствующих по своим характеристикам результатам проектных электродинамических расчетов. Прочие детали прототипа, однако, спроектированы с целью изготовления из коммерчески доступного материала и заготовок отечественного производства. На этапе производства прототипа предусматривается проведение реверс-инжиниринга готовых изделий для восстановления технологии их производства и последующей локализации с целью снижения связанных рисков.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлена концепция мощного объединителя мощности постоянного действия 16:1 и его прототип 4:1. Объединитель основан на волноводе типа WR1800 и оптимизирован для выходной мощности 500 кВт. Вводами в объединитель служат штыревые антенны. Конструкция разработанного объединителя получилась широкополосной, сбалансированной, перестраиваемой и масштабируемой. Данная концепция суммирования мощности дает гибкость в выборе дизайна ускорительных комплексов вне зависимости от частот и мощностей усилителей, которые есть в наличии. Для апробации технологий изготовления и характеристик объединителя был разработан и отдан в производство прототип 4:1.

Дополнительным преимуществом использования такого объединителя вместе с радиальными промежуточными объединителями оказалась очень низкая, почти нулевая, пропускная способность на гармониках рабочей частоты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Rampnoux E., Bousson S., Brault S., Duchesne P., Duthil P., Olry G., Reynet D.* // Proc. of SRF2013. 2013. Paris, France. P. 1069.
2. https://ctd.inp.nsk.su/wiki/images/f/f3/CDR2_ScTau_ru_vol2.pdf
3. <https://ctd.inp.nsk.su/c-tau/>
4. <https://www.nxp.com/docs/en/datasheet/MRFE6VP61K25H.pdf>
5. <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/MRF1K50N.pdf>
6. *Sharkov G.B., Smirnov A.Yu.* // Proc. Of LINAC2014. Geneva, Switzerland. TUPP137. P. 733.
7. *Goryashko V.A., Dancila D., Rydberg A., Yogi R., Ruber R.* // J. Electromagn. Waves Appl. 2014. V. 28. №18. P. 2243. <https://doi.org/10.1080/09205071.2014.962187>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Резонаторный объединитель мощности 105:1.
- Рис. 2.** Концепция субмегаваттного усилителя мощности.
- Рис. 3.** Концепции волноводного объединителя ВЧ-мощности.
- Рис. 4.** Антенный узел с водяным охлаждением.
- Рис. 5.** S-параметры объединителя 16:1 в диапазоне частот 498–502 МГц.
- Рис. 6.** Уровень выходной мощности в диапазоне частот 0–3.5 ГГц.
- Рис. 7.** Узел ввода мощности прототипа объединителя 4:1.
- Рис. 8.** S-параметры прототипа объединителя 4:1.
- Рис. 9.** Результаты численного моделирования нагрева прототипа 4:1.
- Рис. 10.** Распределение скорости потока воды в узле охлаждения прототипа 4:1.
- Рис. 11.** Подстроечные элементы объединителя.
- Рис. 12.** Импедансная характеристика прототипа объединителя при варьировании длины диэлектрических вставок.

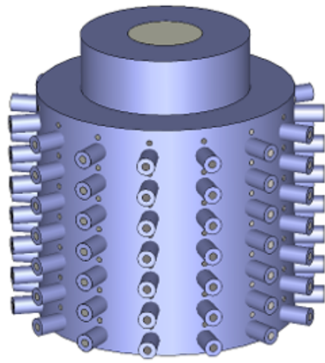


Рис. 1.

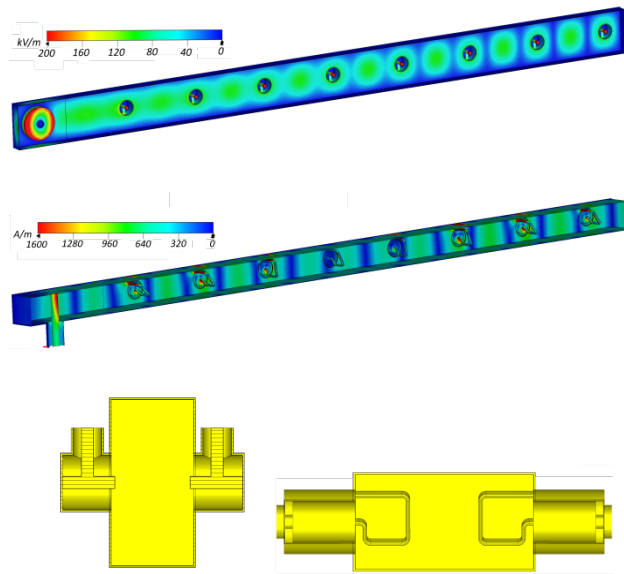


Рис. 3.

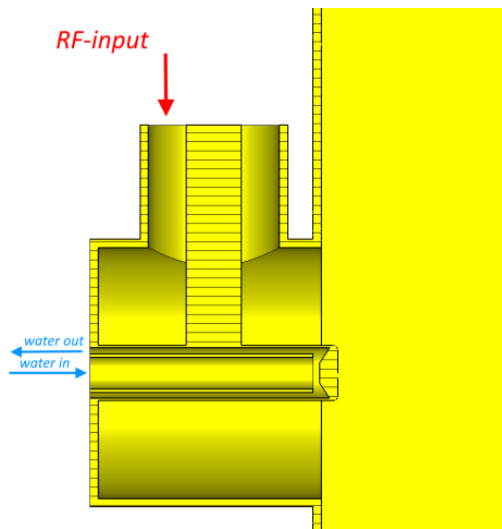


Рис. 4.

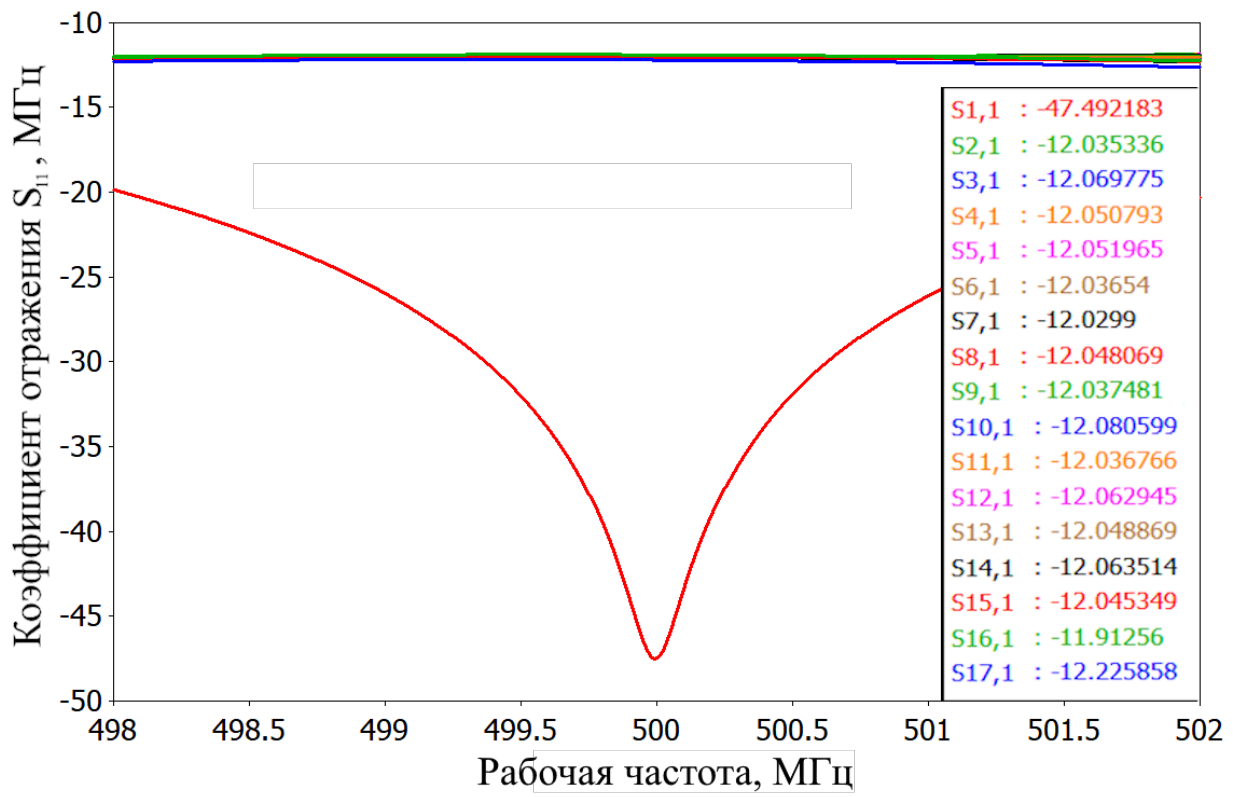


Рис. 5.

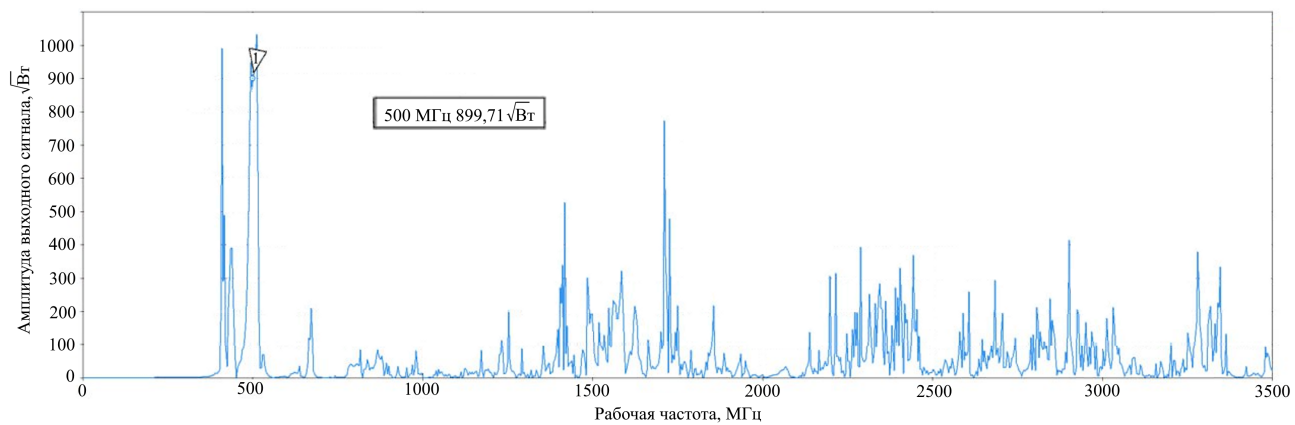


Рис. 6.

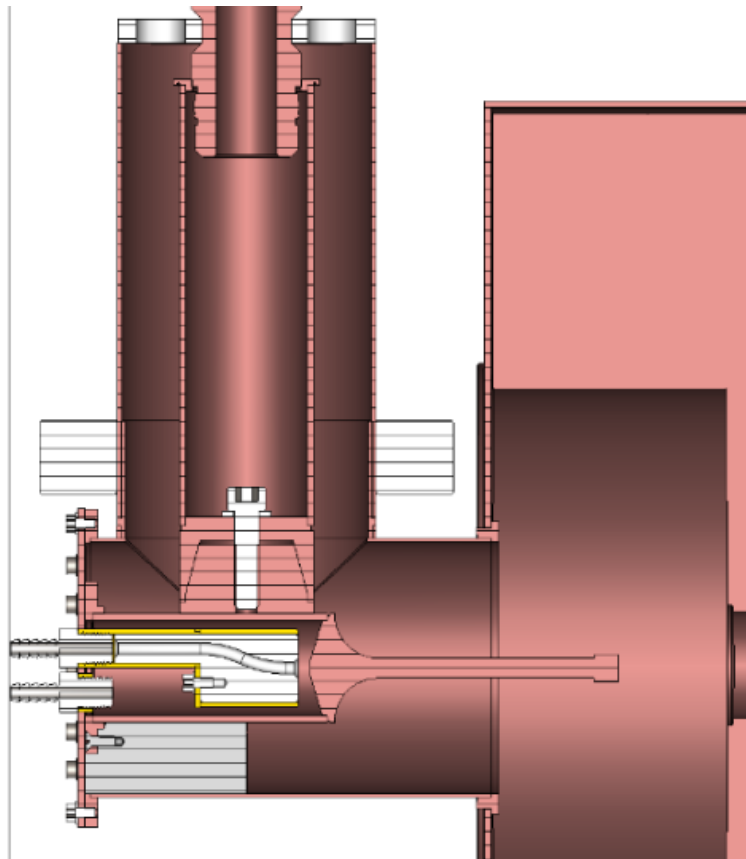


Рис. 7.

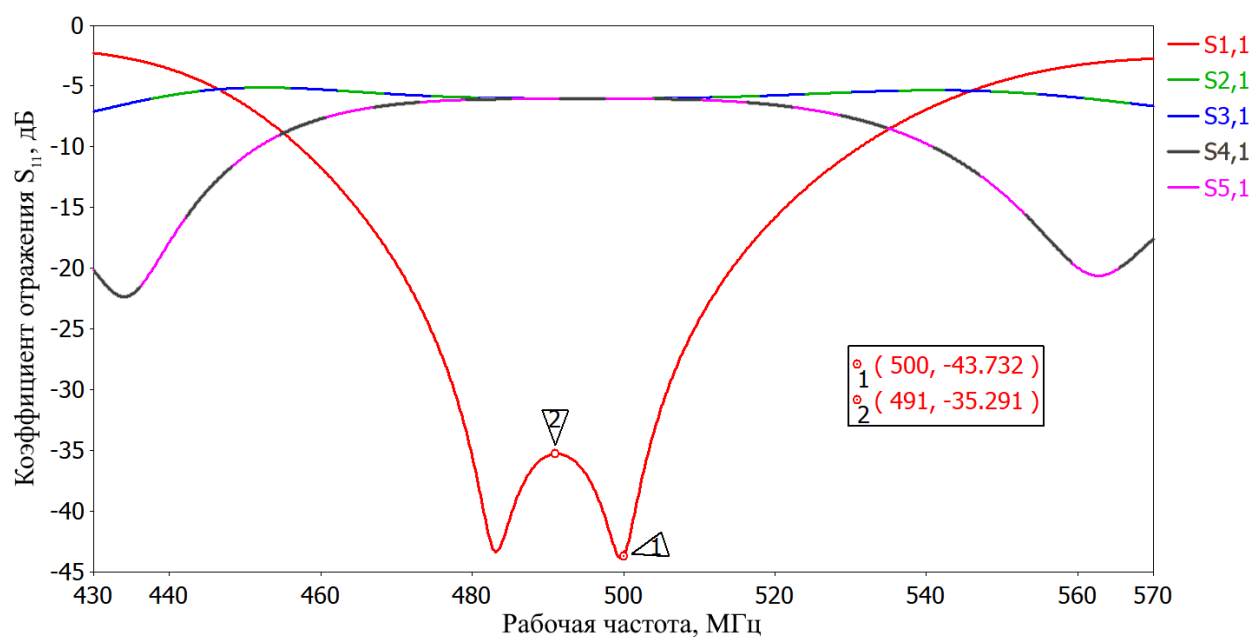


Рис. 8.

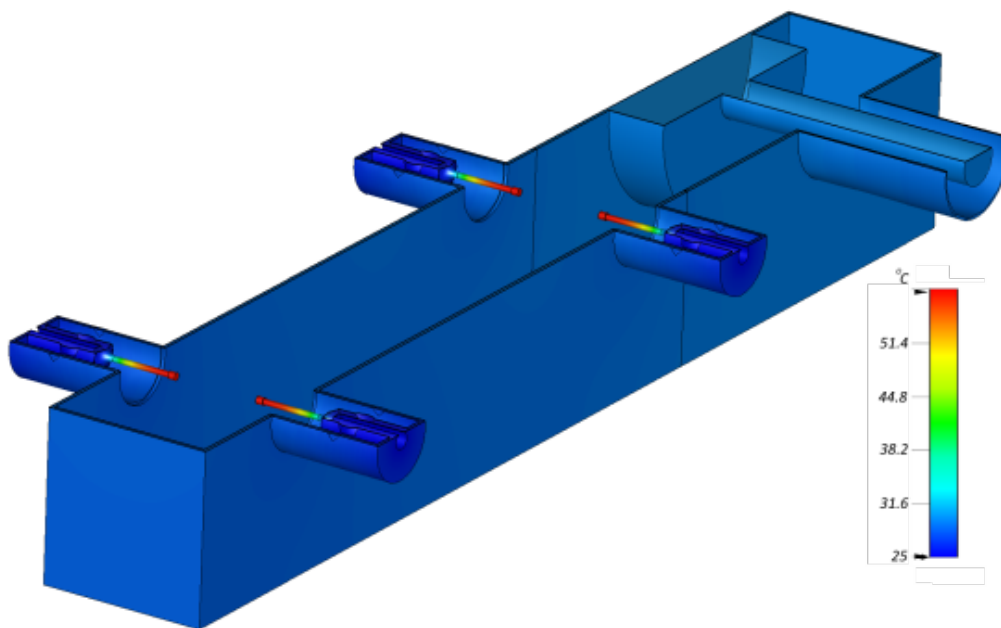


Рис. 9.

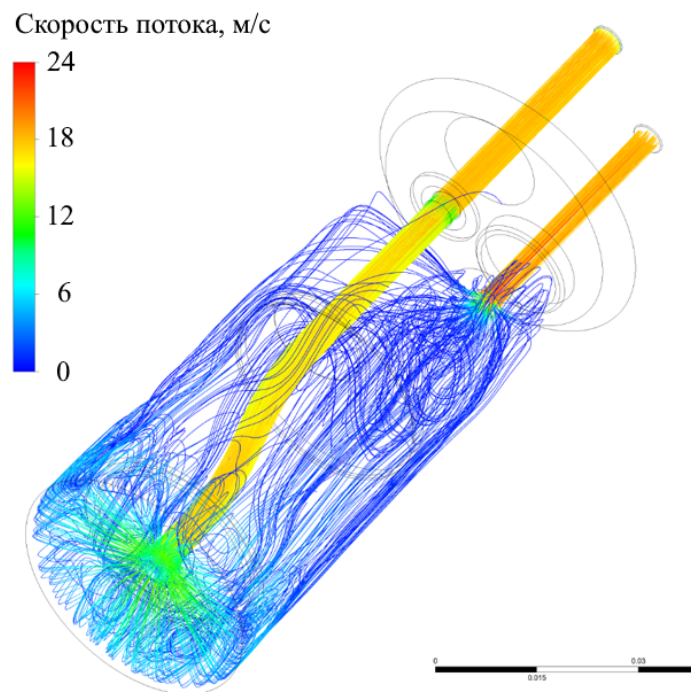


Рис. 10.

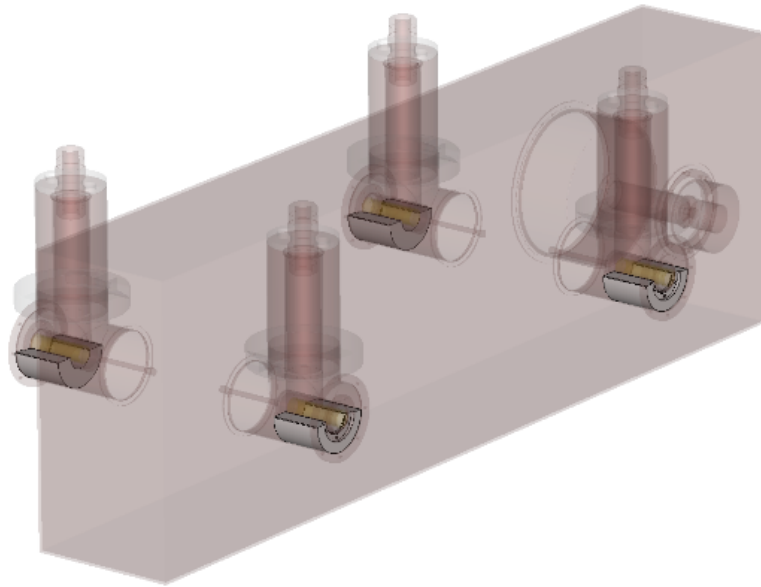


Рис. 11.

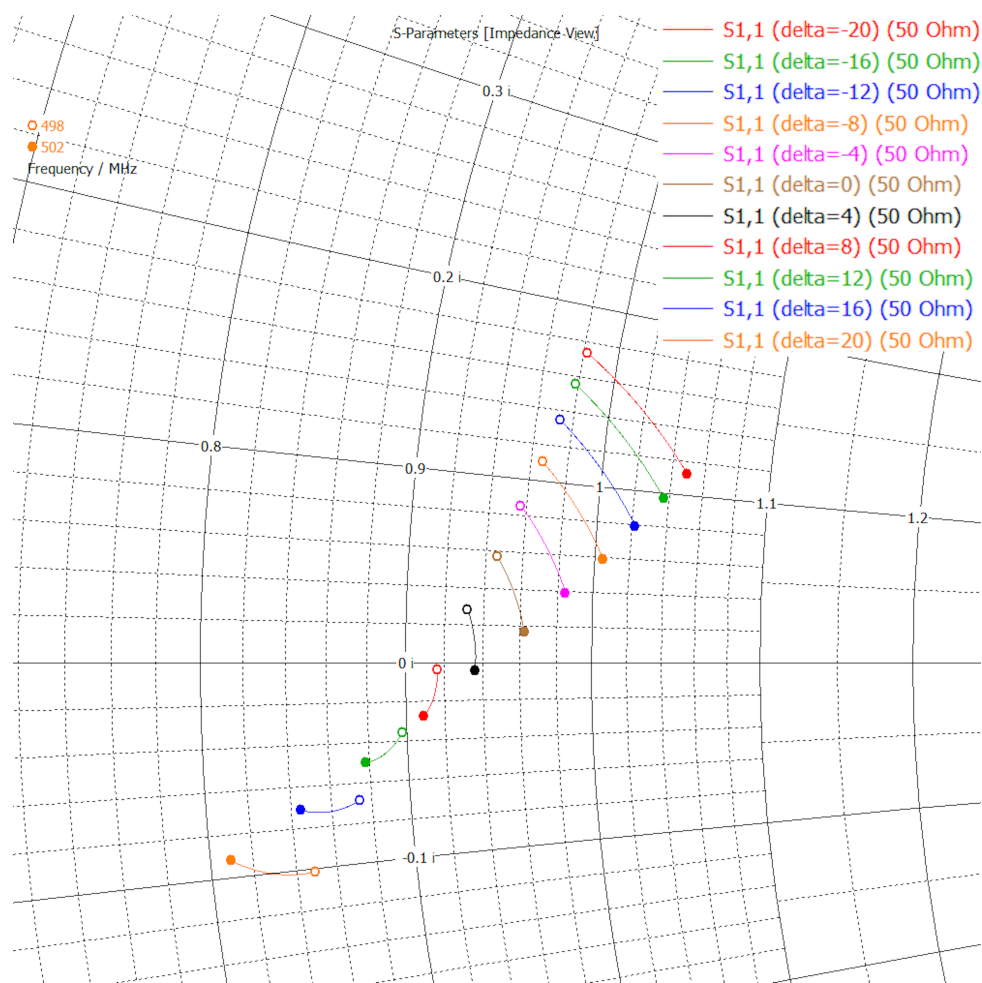


Рис. 12.

Для связи с авторами:

Лозеева Татьяна Андреевна

E-mail: TALozeeva@mephi.ru

Тел.: 8-915-085-51-63 (моб.)

Лозеев Юрий Юрьевич

E-mail: YYLozeev@mephi.ru

Тел.: 8-985-842-43-25 (моб.)

Шарков Георгий Борисович

E-mail: GBSharkov@mephi.ru

Тел.: 8-916-535-67-16 (моб.)

Морозов Андрей Андреевич

E-mail: AAMorozov@mephi.ru

Тел.: 8-926-744-21-97 (моб.)

Для переводчика:

A CONCEPT OF A 16:1 WAVEGUIDE COMBINER FOR HIGH POWER APPLICATIONS*

Y. Y. Lozeev[†], T.A. Lozeeva, G.B. Sharkov

, A.A. Morozov

National Research Nuclear University “MEPhI”, Moscow, Russia

Abstract

A concept of a 16:1 500 MHz half Megawatt CW power combiner based on the rectangular WR1800 waveguide and its 4:1 prototype version are presented in this paper. This 16:1 combiner was developed for the solid state power amplifier and is supposed to be placed over the set of 19” amplifier racks. The combiner is designed to be modular and scalable, so that any number of input pairs can be added/excluded according to number of amplifier racks and hence output power needed. The 16:1 combiner has eight pairs of input EIA 4 ½” coaxial waveguide ports and ends with the accelerating cavity power coupler. The pairs of input coaxials are located on the wide side of the WR1800 waveguide at the wavelength distance between the pairs and end with coupling antennas. Several design options with antenna and loop inputs were considered during the R&D. The combiner is designed to handle 32 kW of the input power per port and 500 kW in total thus having the antenna water cooling system similar to [1]. Cooling is realized via a shortened 4 ½” line segment and RF power is loaded through the side line.

To check the chosen concept, a 4:1 prototype has been designed. The most critical

elements of the 16:1 combiner - inputs, output, cooling system, tuning elements - are adopted to the 4:1 prototype with the littlest changes to practice the performance and maintenance of these key nodes. A rectangular output of a “door-knob” type connector is used for prototype measurements. The side line for 4:1 prototype has a non 50 Ohm impedance region used for additional antenna matching. The mock-up combiner has a very wide ~50 MHz band and good phase and amplitude balance - less than 1% difference in S_{n1} and 0.5 degrees in phase. This paper contains the results on 16:1 R&D and 4:1 prototype combiner electromagnetic design features, thermal simulation results and variational and tuning characteristics.

INTRODUCTION

Solid state amplifiers (SSA) are lately becoming a respectful and modern substitution to vacuum tube sub megawatt RF power supplies. They are usually made modular and scalable thus consisting of individual power amplifier modules with one or several RF transistors per module.

They are able to generate high power RF signal in 10-1000 MHz range and their performance and output power level depends on the RF transistor gain on the frequency desired and are usually limited by 4 kW pulsed per module. To obtain higher power levels various kinds of power combiners are used. E.g. planar combiners of Wilkinson or Gysel type might be used to combine RF power from several transistors inside the module. For tens and hundreds of kW spatial combiners are usually used – either cavity or various types of waveguide transition line combiners.

The main user of sub megawatt powers at MHz frequencies is particle accelerator community. They are often compelled to compromise on the accelerator facilities design with respect to the parameters of the existing amplifiers. One of the cases is a new Super Tau Charm Facility project at NCPHM (Satis, Russia), where the developers are considering to shift from the designed frequency 500 MHz to 350 MHz [2,3]. Though it is possible to manufacture a 500 MHz amplifier, it becomes more complicated when the output power to be loaded to the accelerating cavity lies in the range of hundreds of kW. The concept of such a SSA for NCPHM facility, capable of delivering 500 kW at 500 MHz and its 16:1 CW power combiner is discussed.

SUB-MEGAWATT SSA CONCEPT

The RF transistors at 500 MHz frequency are able to produce about 1 kW of output CW RF power [4,5], so to obtain the final 500 kW power one will need 500+ transistors. These transistors are usually packed into some assemblies, so that several transistors comprise an independent amplifying unit for several kW power. For higher power one might sum the power from all the amplifier units, or modules (PAMs), in one stage – by using a cavity type or radial or coaxial type combiner. In radial and coaxial combiners the power inputs are located on the periphery of the radial or coaxial line, so the combiner for 500+ inputs would be quite big. In cavity combiners cylindrical cavities on TM_{010} mode are usually used, so that the mode spatial configuration allows one to evenly distribute power inputs on the cavity iris (Fig. 1). However, to excite the TM_{010} mode the cavity at 500 MHz would have 229 mm radius and about 400 mm height. Assuming the input power is applied through

DIN 7/16 cables the surface of the cavity allows one to distribute only about 105 inputs that is to obtain 100-200 kW of output power. To get more power and hence to place more inputs one will need a larger cavity operating at different excitation mode, which leads to another, inconvenient (if ever possible), placement of the inputs.

The other way of combining – by using a cascade of 2:1 or 3 dB combiners (magic-Tees, rat race etc.) implies several percent of power losses along the summation tree. Besides, when one of the PAMs, connected to the 2:1 combiner ports, performs poorly or is turned off the power from the remaining module is not transferred entirely to the output port, but splits between the ports and goes partly back to the unmatched turned off module.

The remaining option here is to use waveguide combiners with the wavelength spacing between the inputs, that also cannot be used as a one stage combiner for 500+ inputs.

Figure 1: 105:1 cavity combiner

So, at least two stages of power summation will be needed. The suggestion is to use power amplifier modules with two transistors and then use two stages of 16:1 summation. First stage suggests a rectangular coaxial 16:1 combiner of [6] type. For the second stage a rectangular waveguide combiner is proposed (Fig.2).

Figure 2: Sub-megawatt SSA concept

16:1 POWER COMBINER CONCEPT

A WR1800 rectangular waveguide based combiner that is able to operate with 32 kW per port and 500 kW in total is shown in Fig.3.

Figure 3: 16:1 combiner concepts

Since the combiner has to handle 500 kW in CW regime even tenths of percent of losses will lead to hundreds of Watts of heat and an active cooling of whatever the coupling elements will be is needed. During the R&D two versions of the combiner were suggested – the one with the coupling loops and the one with the capacity coupling antennas. Both versions assumed the pairs of the coupling elements to be placed on a wavelength distance on a WR1800 waveguide with one of the ends shortened and the other one having the cavity power coupler connected.

The version with coupling loops was preferable at first due to the enormous experience with the loop cooling gathered from cavity power coupler development and due to the absence of necessity to deal with the high electric field region. The tuning of power coupling coefficients S_{n1} was supposed to be done via loop rotation and the matching of the loops was realized with the matching lines of non 50 Ohm impedance at the entrance of each loop. Such a system, though, turned out to be extremely sensitive to the loop misalignments and difficult to tune. The quite big coupling loops of the power combiner, contrary from the cavity power coupler loops, brought in the additional inductive load and varying wavelength inside the WR1800 waveguide, making it impossible to place the loops with the wavelength spacing to even power division S_{n1} . To match the loops to the cavity they have to be turned by 1 degree which is complicated both for manufacturing and tuning. Therefore, the choice was shifted to the antenna coupling, that did not have this drawback. Similar power combiner with T-shaped antennas was designed by the team of Uppsala University for ESS facility [7], though it did not involve active cooling. The concept of antenna coupler node with water cooling, similar to [1] is presented in Fig 4.

Figure 4: Antenna node with water cooling

The RF power is loaded to the WR1800 waveguide through the side 50 Ohm coaxial EIA 4 1/2” line, and water flow is applied through the additional line segment. The most heated elements would be the antennas having the most surface current density. The combiner is supposed to be entirely made out of copper, except for the parts that have to contact with water. Calculated power losses for copper combiner are equal to 625W, which means from the previous experience the real losses will be about 3 kW due to copper surfaces oxidation and connection resistance. For reference, the more available and cheap Aluminum combiner would dissipate about 13 kW of

RF power, which leads to higher antenna temperatures and more transistor loading to compensate the dissipated power.

The combiner, that can be also treated as power divider S-parameter-wise, is tuned to have low return losses (Fig. 5) and good power division balance – S_{n1} oscillates in the range of 0.05 dB with the divided signal phase difference of about 1° @ 500 MHz. The signal is applied to each pair of inputs out of phase, meaning that one of the first stage power combiners inside the amplifier rack will generate signal shifted at 180° from the other one. The combiner has a bandwidth of about 50 MHz @ -3 dB from the regular S_{n1} operating value. One can see that this system does not let the harmonics from power amplifier module through (Fig.6). Such a scheme is an additional benefit in contrast with vacuum tubes and other types of SSA’s power combiners.

Since the antennas are placed to the region of electric field maximum peak surface fields have to be controlled. Peak E field at 500 kW power level does not exceed 0,56 MV/m, which is lower than traditionally considered 3 MV/m being the breakdown electric field strength for dry air.

Figure 5: 16:1 combiner S-parameters in 498-502 MHz range

Figure 6: 16:1 combiner output signal in 0-3.5 GHz range

4:1 POWER COMBINER PROTOTYPE

To test the performance of the key nodes of the main 16:1 combiner a 4:1 prototype was designed for fabrication and measurements. The minor modification of antenna tip and adding one more matching line to the antenna coupler node were the only differences from the main combiner antenna coupler node (Fig. 7).

Figure 7: 4:1 prototype antenna node

The 4:1 prototype combiner is designed with the output 4 1/2” waveguide and its matching “door-knob” element. The 4 1/2”-to-N connector adapter is used for S parameter measurements and a 4 1/2” dummy load is connected for full power tests. The combiner is supposed to be tested in three regimes – 10 dBm to the output port for S parameter measurements, 2,5 kW per port from single PA module and 10 kW per port from four PA modules. The 2,5 kW regime does not require active cooling, since the thermal simulations show the antenna tips will only be heated

to 67°C with the natural convection only, which is a fine copper temperature during the operation (Fig. 9).

Figure 8: 4:1 prototype S-parameters

Figure 9: 4:1 prototype thermal simulation results

The 10 kW per input regime will require active water cooling under 5 bar pressure to hold the antenna temperature within 50-60°C region. The water is applied to the inner shell of the water circuit, and the reverse flow goes through the outer shell (Fig.4). The bottom of the circuit is optimized to have conical or other convex shape to preserve as much as possible the water flow velocity and heat transfer, that worsens when the bottom is flat (Fig.10).

Figure 10: Water flow velocity in the water circuit with conical bottom

The tuning of the ready-made prototype combiner is discrete and is realized via PTFE or POM-C inserts of half-a-cylinder shape size variation (Fig.11). They also act as an additional supporting and centering elements to the antenna assembly. By varying the length of dielectric inserts with the 5 mm step one can tune both the return losses value (Fig. 12) and the power transfer coefficients S_{n1} .

Figure 11: PTFE or POM-C inserts in the 4:1 prototype

Figure 12: Combiner impedance curve with the dielectric inserts length variation

Mechanically prototype consists of four types of subassemblies: main waveguide casing with inbuilt output interface; matching line; antennas; input lines terminated by the input interfaces.

To reduce the impact of imported rigid line component's availability, the waveguides are designed based on off-the-shelf available tubes. The electro-dynamical calculations were performed to get good matching for tubes of standard sizes. Only outer pipes of coaxials are taken from COM-TECH rigidlines manufacturer.

Main waveguide casing is made of 3 mm laser welded copper sheets with custom weld neck flanges for further input lines mounting. Output interface is COM-TECH D-PC130P.

Matching line consists of coaxial welded copper tubes: commercially available tube with 230 mm outer diameter and COM-TECH Rigidline D-

RL103O. Tubes are interconnected via set of custom connecting elements.

Antennas are thoroughly described earlier in the text.

Input lines are also made of welded COM-TECH Rigidline tubes and set of custom copper elements soldered by silver-based alloy. Orthogonal parts of the input lines tied to the main parts by the aluminum clamps. Antennas assembled with the input lines via connecting flanges (Fig 7, left) and taper electrical connectors (Fig. 7 up). Such design allows relatively fast and simple disassembly of antennas in case of dielectric inserts change, yet at the same time doesn't deteriorate waveguide characteristics.

CONCLUSION

The concept of a high-power CW 16:1 power combiner and its 4:1 prototype version was discussed. The combiner is based on a WR1800 waveguide and is optimized to handle 500 kW of output RF power, having cooled coupling antenna tips. The combiner is designed broadband, balanced, tunable and scalable. This concept of power combination gives the flexibility in synchrotrons design regardless of power and frequency of amplifiers. To test the manufacturing technologies and combiner performance a 4:1 prototype was designed and ordered for production.

Additional benefit of the use of proposed combiner together with the intermediate stage combiners is a very low, almost zero, throughput of harmonics.

REFERENCES

- [1] E. Rampoux *et al.*, "Design of 352.21 MHz RF power input coupler and window for the European Spallation Source project (ESS)", in *Proc. of SRF2013*, Paris, France, pp.1069-1072
- [2]https://ctd.inp.nsk.su/wiki/images/f/f3/CDR2_ScTau_ru_vol2.pdf
- [3] <https://ctd.inp.nsk.su/c-tau/>
- [4]<https://www.nxp.com/docs/en/datasheet/MRFE6VP61K25H.pdf>
- [5] <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/MRF1K50N.pdf>
- [6] G.B. Sharkov *et al.*, "High power solid-state amplifiers. New developments and technology comparison", in *Proc. Of LINAC2014*, Geneva, Switzerland, paper TUPP137, pp. 733-735
- [7] V.A. Goryashko *et al.*, "A megawatt class compact power combiner for solid-state amplifiers", *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol.28, no.18, pp.1-13, 201

