Использование плоскостей симметрии волноводных структур при расчёте в ANSYS HFSS

Виктор Конев, Александр Курушин, Евгений Изидорович Лаврецкий Евгений Новосёлов, Валентин Чернышов

С помощью программы ANSYS HFSS проведены расчёты осесимметричного перехода между круглыми волноводами и перехода от круглого волновода к прямоугольному волноводу. Рассмотрено возбуждение переходов разными модами круглого волновода (TE11, TM01 и TE21). Ширина относительной полосы частот при расчёте составляла 40% (8...12 ГГц), наибольший поперечный размер волноводов равен 2,4 λ на центральной частоте. Показано, что для подобных вычислительных задач применение ANSYS HFSS может давать ошибочные результаты из-за ограничения максимального числа мод в волновых портах 25 модами. Предложено вводить в анализируемой структуре продольные плоскости симметрии, на которых должны быть введены граничные условия, соответствующие возбуждающим модам, и получать вырезки в форме «половинки» или «четвертинки» структуры. Результаты расчёта в ANSYS HFSS для «четвертинки» структуры сравниваются с результатами, полученными по методу моментов, и получено полное совпадение.

Введение

Одной из наиболее мощных программ электродинамического моделирования, широко применяемых в практической деятельности для расчётов различных волноводных структур и антенн, является пакет ANSYS [1, 2]. При расчёте волноводных структур в ANSYS HFSS возбуждение обычно вводится в виде волновых портов (Wave port). По умолчанию в волновых портах вводится по одной моде. Результатом расчёта является S-матрица волноводной структуры. При задании в волновых портах нескольких мод рассчитывается многомодовая S-матрица. Максимальное число мод в волновых портах в ANSYS HFSS ограничено и равно N = 25.

В данной статье рассмотрены две расчётные модельные задачи. Первая задача состоит в расчёте волноводной конструкции, представляющей собой



Рис. 1. Осесимметричный ступенчатый переход между круглыми волноводами

ступенчатый переход между круглыми волноводами (рис. 1). Диаметр меньшего волновода выберем равным Ø36 мм, диаметр большего волновода выберем равным Ø72 мм. Введем три ступени между волноводами: первая ступень с диаметром D1 = Ø45 мм и длиной L1 = 10 мм; вторая ступень с $D2 = \emptyset54$ мм, L2 = 10 мм; третья ступень с $D3 = \emptyset 63$ мм, L3 = 10 мм. Для всех цилиндрических областей вводим сегментацию с числом сегментов Nseg = 36. Сегментация позволяет контролировать точность расчёта, так как задаёт явным образом аппроксимацию криволинейных поверхностей плоскими участками, которая необходима для введения сетки тетраэдров. Длина регулярного волновода слева и справа была равна в проекте Lreg = 35 мм.

Вторая задача состоит в расчёте волноводной конструкции, которая пока-



Рис. 2. Ступенчатый переход между круглым и прямоугольным волноводами

зана на рис. 2. Структура представляет собой аналогичный ступенчатый переход (все диаметры и длины круглых волноводов слева те же), но заканчивающийся прямоугольным волноводом $ax \times ay = 72 \times 63$ мм (вместо круглого волновода Ø72 мм). В отличие от предыдущей осесимметричной структуры, данная структура с прямоугольным волноводом имеет только две плоскости симметрии – продольные плоскости XOZ и YOZ.

Волновые порты будем обозначать как порт 1 и порт 2 (см. рис. 1 и 2). Будем интересоваться случаем возбуждения со стороны порта 1 (меньшего круглого волновода, имеющего Ø36 мм). В табл. 1 приведены критические диаметры [3] и критические частоты (частоты отсечки) для нескольких интересующих нас низших мод круглого волновода для Ø36 мм.

Расчёт будем проводить в диапазоне частот от 8 до 12 ГГц. В указанном диапазоне частот вхолной волновол Ø36 мм является многомодовым, что позволяет выполнить расчёт одной и той же конструкции при возбуждении разными модами круглого волновода. На центральной частоте рабочего диапазона (10 ГГц) диаметры входного и выходного волноводов равны в длинах волн \emptyset 36 мм = 1,2 λ и \emptyset 72 мм = 2,4 λ соответственно, что представляет собой достаточно небольшой размер. В волновых портах слева и справа будем вводить по 25 мод (максимальное разрешённое количество).

В представленных далее результатах расчётов показано, что непосредственный расчёт структур на рис. 1 и 2 в HFSS



M	Іода	Критические диаметры, $rac{D}{\lambda_{_{\! \!$	Критическая частота, ГГц
Т	E11	0,586	4,883
TI	M01	0,766	6,383
Т	E21	0,972194	8,102
Т	E01	1,21967	10,164
Т	M11	1,21967	10,164

даёт неверные результаты. Для получения корректных результатов следует вводить в структурах продольные плоскости симметрии, позволяющие сделать вырезки из полных структур. Расчёт в HFSS для вырезок в виде «четвертинок» из модельных структур давал корректный результат благодаря тому, что в волновых портах вводились только моды, имеющие нужные плоскости симметрии, тем самым обеспечивался учёт всех необходимых мод для структур заданного электрического размера.

Продольные плоскости симметрии волноводных структур

Программа ANSYS HFSS при запуске проекта на счёт первым делом анализирует волновые порты, рассчитывает распределения поля для всех заданных мод. Моды распределяются по номерам по возрастанию в порядке их выхода из отсечки. На рис. 3 показаны распределения поперечного электрического поля в волновых портах для нескольких основных (низших) мод круглого волновода. Такими модами являются моды TE11 (две поляризации), TM01, TE21 (две поляризации), TE01, TM11 (две поляризации).

Если рассчитываемая волноводная структура не обладает продольными плоскостями симметрии, то для любой падающей моды на волновых портах могут возбуждаться все возможные моды, вышедшие из отсечки в подводящих волноводах.

На практике часто используются осесимметричные волноводные структуры, например, переходы между круглыми волноводами разного диаметра (рис. 1). Для таких структур в волновых портах будут возбуждаться только моды, имеющие тот же номер азимутальной гармоники, что и в падающей волне [4]. В программе HFSS расчёт матрицы рассеяния выполняется сразу по всем заданным на волновых портах модам. Таким образом, пользователь программы может немедленно (после получения решения) проанализировать результаты возбуждения волноводной структуры для разных падающих мод. Для осесимметричной волноводной конструкции структура многомодовой матрицы рассеяния такова, что развязанными являются блоки, соответствующие разным азимутальным гармоникам поля возбуждения.

Возможна следующая ситуация, когда пользователя ANSYS HFSS интере-



Рис. З. Моды круглого волновода

сует матрица рассеяния только для одного вида возбуждения волнового порта (одной моды). В этом случае расчёт осесимметричной волноводной структуры может быть выполнен с введением продольных плоскостей симметрии, соответствующих возбуждающей моде (сама структура в силу осевой симметрии имеет бесчисленное число плоскостей симметрии). Например, волна ТЕ11 круглого волновода имеет две плоскости симметрии электрическую стенку (Perfect E), на которой тангенциальная компонента электрического поля равна нулю, и магнитную стенку (Perfect H), на которой тангенциальная компонента магнитного поля равна нулю (рис. 3). Тогда волновод может быть разрезан пополам, в плоскости разреза введено соответствующее граничное условие (Perfect Е или Perfect H), а расчёт может быть выполнен для «половинки» волновода. Можно ввести сразу две плоскости симметрии, тогда от волновода отрезается «четвертинка», на одной плоскости разреза вводится Perfect E, на второй Perfect H; расчёт может быть выполнен для «четвертинки» волновода.

Волна ТМ01 круглого волновода является осесимметричной, поэтому из волновода с такой волной может быть отрезана половина волновода с введением в плоскости разреза граничного условия Perfect H, или вырезана произвольная секторная «долька», ограниченная двумя магнитными стенками Perfect H (рис. 3). Волна ТЕО1 круглого волновода также является осесимметричной, поэтому из волновода с такой волной также может быть вырезана секторная «долька», но ограниченная двумя электрическими стенками Perfect E (рис. 3). Здесь наиболее удобно вводить секторную «дольку» 90°



(«четвертинка» волноводной структуры)



Рис. 5. Ступенчатый переход от круглого к Рис. 4. Осесимметричный ступенчатый переход прямоугольному волноводу («четвертинка» волноводной структуры)



Рис. 6. Коэффициенты отражения и прохождения волны ТЕ11 для осесимметричного ступенчатого перехода (полная структура, рис. 1)



Рис. 7. Коэффициенты отражения и прохождения волны ТЕ11 для осесимметричного ступенчатого перехода («четвертинка», рис. 4)



Рис. 8. Коэффициенты отражения и прохождения для осесимметричного ступенчатого перехода, падение волны ТЕ11 (расчёт методом моментов)

(т.е. «четвертинку» волновода), используя операцию Split по координатным плоскостям XOZ и YOZ (z – продольная координата). Для мод ТЕ21 существует возможность либо разрезать волновод пополам, введя одну магнитную Perfect Н или одну электрическую стенку Perfect E, либо ввести пару одинаковых стенок, расположенных по координатным плоскостям или по диагональным плоскостям (рис. 3).

Таким образом, можно выполнять только одну операцию Split, вводя только одну продольную плоскость симметрии (получаем половину структуры), либо выполнять две операции Split (получаем «четвертинку» структуры). Однако расчёт с двумя плоскостями симметрии (для «четвертинки») проводить более выгодно, чем для половины структуры, так как физический объём в 2 раза меньше (меньше нужно тетраэдров), расчёт выполняется быстрее и с более высокой точностью. На рис. 4 и 5 показаны конструкции вырезок в виде «четвертинок» структур, приведённых на рис. 1 и 2.

После того как пользователь ANSYS HFSS вырезал «четвертинку» структуры, он должен ввести на плоскостях разреза граничные условия (Perfect E или Perfect H), соответствующие падающей моде. В результате этого при расчёте волновых портов программа будет распределять моды по номерам в порядке их выхода из отсечки уже не для волновода полного сечения, а для волновода с предписанными плоскостями симметрии (или, что то же самое, для «четвертинки» волновода). Тем самым программа будет выполнять сепарацию мод, используя на волновых портах только моды с требуемыми плоскостями симметрии (т.е. с нужными азимутальными индексами в случае круглого волновода). В волновых портах слева и справа для конструкций на рис. 4 и 5 также будем вводить по 25 мод (максимальное разрешённое количество).

Результаты расчётов

Результаты расчёта в ANSYS HFSS для осесимметричного волноводного перехода между круглыми волноводами (см. рис. 1) при возбуждении волной ТЕ11 даны на рис. 6, где приведены только коэффициенты отражения и передачи по волне ТЕ11 (есть и другие возбуждаемые волны TE1m и TM1m).

На рис. 7 приведены соответствующие результаты расчёта для «четвертинки» полной структуры (см. рис. 4), когда на разрезах были введены одна плоскость Perfect H и одна плоскость Perfect E.

Сравнение результатов на рис. 6 и 7 показывает значительные отличия как для коэффициентов отражения, так и коэффициентов прохождения. Для проверки был выполнен расчёт структуры той же геометрии с помощью другой программы путём решения системы интегральных уравнений для магнитных токов в отверстиях связи (метод моментов) [4]. Результаты расчётов показаны на рис. 8. Легко видеть, что результаты расчётов по методу моментов в части элементов матрицы рассеяния для моды ТЕ11 совпали с результатами расчётов в ANSYS HFSS для «четвертинки» (рис. 7). На рис. 8 дополнительно даны S11full, S22full - коэффициенты отражения и передачи, рассчитанные по сумме мощностей всех отражённых и прошедших мод. При выходе из отсечки волны ТМ11 подводящего волновода (см. табл. 1) видим отличия полного коэффициента отражения S11full от коэффициента отражения S11 только по волне ТЕ11.

Анализ показывает, что расчёт полной структуры (рис. 1) в Ansys HFSS в лоб давал ошибочный результат, так как на волновом порту большего круглого волновода (порт 2) не были учтены все распространяющиеся моды. Эти моды оказывались закороченными в волноводе, что приводило к неверному результату. Таким образом, разрешённых 25 мод уже недостаточно для корректного учёта всех распространяющихся волн даже для круглого волновода сравнительно небольшого диаметра 2,42 (для 10 ГГц - средней частоты диапазона расчёта). При расчёте же «четвертинки» структуры на волновых портах учитывались только моды, имеющие две плоскости симметрии (Perfect E и Perfect H), ненужные моды сепарировались, поэтому здесь было достаточно разрешённых 25 мод.

Проведём далее аналогичный расчёт для падающей моды TM01. На рис. 9 и 10 даны результаты расчёта в ANSYS HFSS для полной структуры и для «четвертинки» (с введением двух плоскостей Perfect H) соответственно.

На рис. 11 даны результаты расчёта по методу моментов. Как и для случая падения волны ТЕ11, здесь наблюдается совпадение результатов расчёта только



Рис. 9. Коэффициенты отражения и прохождения волны ТМО1 для осесимметричного ступенчатого перехода (полная структура, рис. 1)



Рис. 10. Коэффициенты отражения и прохождения для волны ТМО1 для осесимметричного ступенчатого перехода («четвертинка», рис. 4)



Рис. 11. Коэффициенты отражения и прохождения для осесимметричного ступенчатого перехода, падение волны ТМО1 (расчёт методом моментов)



Рис. 12. Коэффициенты отражения и прохождения волны TE21 для осесимметричного ступенчатого перехода (полная структура, рис. 1)



Рис. 13. Коэффициенты отражения и прохождения для волны TE21 для осесимметричного ступенчатого перехода («четвертинка», рис. 4)



Рис. 14. Коэффициенты отражения и прохождения для осесимметричного ступенчатого перехода, падение волны TE21 (расчёт методом моментов)

для «четвертинки» и метода моментов. Для полной структуры (рис. 1) имелся неверный расчёт для частот f>11,4 ГГц, где возбуждались высшие моды, не учтённые в волновых портах.

Проведём аналогичный расчёт для случая падения моды ТЕ21. Результаты ANSYS HFSS даны на рис. 12 и 13 для полной структуры и для «четвертинки» (с введением двух плоскостей Perfect H) соответственно. Результаты расчёта на рис. 12 демонстрируют наличие резонанса в области частоты ≈11,3 ГГц, данный резонанс отсутствует на рис. 13. На рис. 14 даны результаты расчёта по методу моментов. Как и в двух предыдущих случаях, результаты расчётов методом моментов совпадают с расчётом методом конечных элементов в ANSYS HFSS только для вырезки в виде «четвертинки» структуры.

Проведём дополнительно расчёт для волноводных конструкций на рис. 2 и 5 при падении волны TE11 вертикальной поляризации в круглом волноводе. На рис. 15 и 16 даны результаты расчёта в Ansys HFSS для полной структуры и для «четвертинки» (YOZ - Perfect H, XOZ -Perfect E) соответственно. Коэффициент передачи в прямоугольный волновод дан для моды ТЕ10. На рис. 17 даны результаты расчёта по методу моментов. Как и ранее, корректный результат в ANSYS HFSS был получен только для «четвертинки». Заметим, что, в отличие от осесимметричной задачи (рис. 1 и 4), где задача разделяется по независимым гармоникам поля, в задаче о переходе к прямоугольному волноводу в круглых апертурах связи возбуждаются все нечётные гармоники поля (TE1m+TM1m, TE3m+TE3m, ТЕ5m+ТМ5m и т.д.).

Заключение

С помощью программы ANSYS HFSS проведены расчёты двух модельных волноводных задач. Первая модельная задача представляла собой ступенчатый осесимметричный переход между круглыми волноводами при возбуждении тремя разными модами круглого волновода (ТЕ11, ТМ01 и ТЕ21). Вторая модельная задача представляла собой тот же ступенчатый переход, но заканчивающийся прямоугольным волноводом (вместо круглого); при этом структура имела две плоскости симметрии. Ширина относительной полосы частот при расчёте составляла 40% (8÷12 ГГц), наибольший поперечный



Рис. 15. Коэффициенты отражения (ТЕ11) и прохождения (ТЕ10) для перехода, падение волны ТЕ11 (полная структура, рис. 2)



Рис. 16. Коэффициенты отражения (ТЕ11) и прохождения (ТЕ10) для перехода, падение волны ТЕ11 («четвертинка», рис. 5)



Рис. 17. Коэффициенты отражения и прохождения перехода между круглым и прямоугольным волноводами, падение волны TE11 (метод моментов)

размер волноводов был равен всего 2,4х на центральной частоте. Расчёты показали, что для подобных простых вычислительных задач применение ANSYS HFSS «в лоб» может давать ошибочные результаты из-за ограничения максимального числа мод в волновых портах 25 модами. Проблема расчёта в ANSYS HFSS была решена путём использования плоскостей симметрии для возбуждающих мод. Так, для случая падающей волны ТЕ11 были введены граничные условия в форме электрической и магнитной стенок, была получена вырезка в виде «четвертинки» структуры, для которой ANSYS HFSS автоматически отбрасывал в волновых портах моды, не обладающие предписанными плоскостями симметрии, в результате чего все распространяющиеся моды были учтены. Аналогичные плоскости симметрии вводились при возбуждении модами ТМ01 и ТЕ21. Результаты расчёта в ANSYS HFSS для «четвертинок» структуры сравнивались с результатами, полученными по методу моментов, показано полное совпадение результатов.

Проведённые расчёты продемонстрировали необходимость для пользователя ANSYS HFSS внимательно контролировать число мод в волноводных портах и электрический размер подводящих волноводов. Пользователь при работе с программой должен проявлять «гибкость», вводя по возможности плоскости симметрии для создания «вырезок» из структуры. Заметим, что метод моментов практически не имеет ограничений на электрический размер подводящих волноводов и число мод в портах, поэтому может быть использован для расчётов структур с подводящими волноводами большого электрического сечения. В то же время метод моментов уступает ANSYS HFSS по универсальности и возможности анализа произвольных волноводных конструкций. Заметим, что если требуется выполнять расчёт структур без продольных плоскостей симметрии, то ситуация для ANSYS HFSS здесь усугубляется, так как нет возможности делать вырезки из структуры («половинки» и «четвертинки»). В силу этого корректный результат может быть получен только для подводящих волноводов с ограниченными сечениями. Θ