

Министерство образования и науки Российской Федерации  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ  
Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра дискретной математики  
и информационных технологий

**Компьютерное моделирование волноведущих систем приборов  
СВЧ, применяемых в телекоммуникационных системах**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

Магистра 2 курса 271 группы  
направления 09.04.01 «Информатика и вычислительная техника»  
факультета компьютерных наук и информационных технологий  
Аль Джухайши Нидхал Ахмед Джахир

Научный руководитель

к. ф.-м.н., доцент

\_\_\_\_\_

подпись, дата

А.Д. Панферов

Заведующий кафедрой

к. ф.-м.н., доцент

\_\_\_\_\_

подпись, дата

Л.Б. Тяпаев

Саратов 2017

## ВВЕДЕНИЕ

Математическое моделирование поведения различных динамических систем и процессов в них является одним из основных методов исследования в самых разных областях знаний, охватывающих практически все сферы человеческой деятельности.

Успехи в развитии вычислительной техники позволяют эффективно осуществлять компьютерное моделирование, анализ и синтез различных компонентов СВЧ устройств, используя, как разработанные ранее методы, так и их специализированные модификации, предназначенные для выполнения на параллельных вычислительных системах.

Одной из проблем при разработке мощных СВЧ ламп бегущей волны О-типа (ЛБВО), используемых в качестве выходных усилителей спутниковых систем связи и радиолокационных систем, является разработка адекватных математических моделей замедляющих систем ЛБВО, позволяющих осуществлять не только анализ их электродинамических характеристик (ЭДХ), но и синтез ЗС в реальном времени для получения требуемых выходных параметров ЛБВО.

Для решения данной задачи, как правило, используют представление замедляющей системы (ЗС) мощной ЛБВО, обычно представляющей собой цепочку связанных резонаторов (ЦСР), в виде цепочки соответствующих ячейкам ЗС шестиполосников, основываясь на предположении о дискретном взаимодействии электронного пучка с полем электромагнитной волны, распространяющейся в ЗС. При этом шестиполосники могут моделироваться как распределёнными, так и сосредоточенными параметрами. Все вышесказанное и определило актуальность работы.

Целью и задачами работы являются:

- изучение алгоритма расчёта взаимодействия электронного потока с полями цепочки связанных резонаторов в дискретном приближении по литературным источникам;

- разработка программного модуля, осуществляющего расчёт ЭДХ ячеек ЗС типа ЦСР по полиномиальным регрессионным моделям [дис], построенным по данным физического и планируемого численного экспериментов;

- разработка программного модуля, осуществляющего расчёт матрицы передачи четырёхполюсника эквивалентного ячейке ЗС типа ЦСР с повернутыми на 1800 фаселевидными щелями связи, моделируемой эквивалентной схемой Карно;

- оценка точности определения ЭДХ ячеек ЗС типа ЦСР предложенным способом на основе сравнения с экспериментальными данными.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

### **Моделирование взаимодействия электронного потока с полями цепочки связанных резонаторов в дискретном приближении**

В настоящее время, как указывалось во введении, в телекоммуникационных системах и в радиолокации широкое применение находят мощные ЛБВО с замедляющими системами типа цепочек связанных резонаторов.

Известные методы расчёта выходных характеристик таких СВЧ приборов основаны на предположении о дискретном взаимодействии электронного пучка с полем электромагнитной волны, распространяющейся в ЗС. При этом замедляющая система может моделироваться цепочкой линейных пассивных шестиполюсников с сосредоточенными параметрами, соответствующих ячейкам ЗС.

Начало цепочки через согласующий четырёхполюсник и регулярную линию соединено с источником СВЧ мощности, а конец таким же образом с нагрузкой. Цепочка может состоять из идентичных и неидентичных линейных пассивных шестиполюсников. Источник СВЧ мощности представлен эквивалентным генератором ЭДС с комплексной амплитудой  $E$

и внутренним активным сопротивлением  $r_{0A}$ , равным характеристическому (волновому) сопротивлению входной линии передачи. Активное сопротивление нагрузки  $r_{0B}$  равно характеристическому (волновому) сопротивлению выходной линии.

Передаточные свойства цепочки характеризуют матрицы передачи входного  $a_0$  и выходного  $a_{N+1}$  согласующих четырёхполюсников и матрицы сопротивлений шестиполюсников  $z_k$ , соответствующих ячейкам ЗС ( $k=1, \dots, N$ ;  $N$  – число ячеек).

Элементы этих матриц могут быть получены экспериментальными или расчётными методами

Расчёт ЛБВО на ЦСР основан на совместном (самосогласованном) решении уравнений возбуждения резонаторов ЗС электронным потоком (электродинамическая часть задачи) и уравнений группировки электронного потока в полях резонаторов ЗС (электронная часть задачи). При этом уравнение возбуждения получается линейным. Это позволяет независимо рассматривать у поля часть, возбуждённую внешним сигналом, и часть, возбуждённую токами.

В случае дискретной системы аналогом дифференциальных уравнений возбуждения является конечно-разностная форма, а аналогом интегральной формы – запись в виде конечного ряда, которая может быть получена суммированием воздействия отдельных источников или применением к конечно-разностной форме  $Z$ -преобразования (преобразования Лорана). Конечно-разностные уравнения дополняются граничными условиями, запись в виде конечного ряда удовлетворяет им автоматически.

Идея формулирования уравнений возбуждения цепочки неидентичных линейных пассивных шестиполюсников током, заданным в виде конечного ряда, состоит в том, что все источники тока  $i_k$ ,  $k=1, \dots, N$  возбуждают цепочку независимо, т.е. в соответствии с принципом суперпозиции, являющегося следствием линейности шестиполюсников цепочки

## **Моделирование замедляющих систем типа ЦСР с помощью эквивалентных схем**

Для описания свойств ЗС в частотной области используются дисперсионные характеристики (ДХ) – зависимости длины волны в ЗС или набега фазы на ячейку ЗС от частоты входного сигнала или соответствующей длины волны в свободном пространстве.

Как правило, при изучении свойств замедляющих систем они моделируются бесконечными периодическими структурами. При этом электромагнитное поле (ЭМП) в полосах пропускания ЗС может быть представлено в виде бесконечной суммы пространственных гармоник.

Пространственная гармоника у которой фазовая скорость и направление распространения совпадают со скоростью и направлением перемещения электронного потока ЛБВО называется рабочей. Поэтому для расчёта взаимодействия ЭМП ЗС типа ЦСР с электронным потоком обычно требуется знать дисперсионную характеристику «-1» пространственной гармоники резонаторной полосы пропускания. При этом эффективность взаимодействия зависит от амплитуды рабочей пространственной гармоники и оценивается параметром, называемым сопротивлением связи. ДХ остальных гармоник в полосе пропускания вычисляются с учётом кратности их набега фазы на ячейку ЗС.

Рабочей полосой пропускания ЗС типа ЦСР является самая низкочастотная, называемая резонаторной. При расчёте выходных параметров ЛБВО приходится учитывать также ближайшую к резонаторной высокочастотную полосу пропускания – щелевую.

Эти параметры могут быть получены по размерам ячеек полевыми методами, основанными на решении системы уравнений Максвелла для заданных граничных условий. Однако это требует больших вычислительных и, следовательно, временных затрат. Следовательно дальнейшая оптимизация выходных параметров ЛБВО является трудно выполнимой задачей, так как количество необходимых расчётов увеличивается на несколько порядков.

Более доступным и оперативным способом вычисления ЭДХ ЗС типа ЦСР является замена её электродинамической модели эквивалентной схемой с сосредоточенными параметрами, величины которых могут определяться с помощью различных эмпирических формул. При этом эквивалентная схема, корректно учитывающая структуру полей и связанную с ней картину распределения высокочастотных токов в ЗС, позволяет интуитивно понять процессы взаимодействия ЭМП в ЗС типа ЦСР с электронным потоком и, соответственно, обеспечить получение адекватных результатов при их компьютерном моделировании.

## Определение эквивалентных параметров замедляющих систем типа ЦСР с помощью регрессионных моделей

В работе для построения математических моделей эквивалентных параметров ячеек ЗС типа ЦСР с повернутыми на  $180^0$  секторными щелями связи, моделируемой эквивалентной схемой Карно, применялся регрессионный анализ данных пассивного эксперимента.

Эти математические регрессионные модели для расчёта эквивалентных параметров  $\Lambda_c$  (собственной длины волны резонатора),  $\Lambda_s$  (резонансной длины волны щели связи),  $k_{rs}$  (коэффициента связи между соседними ячейками), представляют собой полиномиальные функции от нормированных размеров ячеек ЗС.

Применение нормированных размеров ячеек ЗС, обеспечивает возможность использования моделей в различных диапазонах длин волн, определяемых периодом  $D$ .

Значения коэффициентов полиномов (108) – (110) представлены в табл. 1.

Таблица 1.  
Коэффициенты полиномиальных моделей эквивалентных параметров ячеек ЗС типа ЦСР

$i$	$a_i$	$b_i$	$c_i$
0	-0.508400	0.241681	4.554840
1	0.046809	-0.178352	-1.324500
2	0.070666	0.143976	-0.442352
3	0.141200	-0.424209	-2.592760
4	0.382905	2.281770	-0.132376
5	0.336518	4.060510	-2.357260
6	0.206441	5.217960	-7.561820
7	-0.142306	-0.458436	0.138449
8	0.049653	-4.887850	12.09860
9	0.002285	0.001750	0.013723
10	0.000543	0.001510	0.004861
11	-0.912826	-7.958810	0.395640
12	-0.003245	0.055715	-0.000471
13	0.058434	0.364729	0.315943
14	0.017021	-6.056150	7.291420
15	-0.002438	0.033043	3.148510
16	0.017498	4.197520	-9.685880

Пределы, в которых изменялись относительные размеры ЗС, при построении моделей, приведены в табл. 2.

Таблица 2.

Пределы изменения относительных размеров моделей  
эквивалентных параметров ЗС типа ЦСР

	$\frac{d_c}{D}$	$\frac{t_d}{D}$	$\frac{2r_5}{D}$	$\frac{r_2}{r_5}$	$\frac{r_1}{r_2}$	$\frac{r_4}{2r_5}$	$\frac{r_3}{r_4}$	$\frac{\alpha}{\pi}$
Min	0.132	0.112	2.516	0.189	0.7	0.411	0.391	0.583
Max	0.7	0.291	4.426	0.375	0.784	0.5	0.6	0.889

Рассчитанные по регрессионным моделям величины  $\lambda_c$ ,  $\lambda_s$ ,  $k_{rs}$  подставляются в дисперсионное уравнение (102), построенное для эквивалентной схемы Карно, которое затем решается относительно длины волны  $\lambda$  при требуемых значениях фазового сдвига на период ЗС, задаваемых в диапазоне  $[0, \pi]$ .

При расчёте по моделям (108) – (110) эквивалентных параметров ячеек ЗС типа ЦСР с повернутыми на  $180^\circ$  фасолевидными щелями связи необходимо увеличить угол разрыва щели связи  $\alpha$  таким образом, чтобы площади фасолевидной и секторной щелей связи были равны.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В нашей работе мы рассмотрели возбуждение цепочки неидентичных линейных пассивных шестиполюсников только одним источником тока. Предполагая, что входного сигнала нет и единственным источником возбуждения цепочки является сторонний ток в шестиполюснике. Далее мы рассмотрели возбуждение цепочки шестиполюсников заданными в виде конечного ряда токами, возбуждение цепочки шестиполюсников входным сигналом, Возбуждение цепочки шестиполюсников входным сигналом и заданными в виде конечного ряда токами.

Так же мы рассмотрели замедляющую систему типа ЦСР с повернутыми на  $180^0$  щелями связи, где определили, что при расчёте выходных параметров ЛБВО приходится учитывать также ближайшую к резонаторной высокочастотную полосу пропускания – щелевую.

Анализ эквивалентной схемы ЗС типа ЦСР, предложенной Карно, показал, что в отсутствии щелей связи, равномерно распределённый по стенкам резонатора ячейки ЗС типа ЦСР ток (индуктивный) течёт вперёд и назад от одной стороны резонатора к другой и замыкается током (ёмкостным) через зазор. Щели связи имеют обычно одинаковый размер и в этом случае указанное распределение токов в резонаторе ячейки ЗС типа ЦСР соответствует делению индуктивности в эквивалентной цепи на четыре части и могут быть представлены в виде параллельного контура, образованного ёмкостью и индуктивностями. Рассчитав эквивалентные параметры, ячейки ЗС типа ЦСР и используя эквивалентную схему, можно построить дисперсионные характеристики ЗС типа ЦСР и определить импеданс взаимодействия электронного потока с полем ЗС (сопротивление связи) в резонаторной и щелевой полосах пропускания.

В случае повернутых на  $180^0$  неперекрывающихся щелей связи в ЗС типа ЦСР, в резонаторе отсутствует часть, участвующая в связи с обеих сторон резонатора. Переключение полярности на выходе эквивалентной схемы обеспечивает её корректное подключение ко входу следующей при соединении в цепочку, т.к. направление движения электронного потока через половинки одного зазора должно быть одинаковым. При этом обеспечивается также согласованный режим передачи энергии в случае бесконечной цепочки из одинаковых ячеек.

Оценка свойств ячейки ЗС типа ЦСР с повернутыми на  $180^0$  щелями связи, моделируемой эквивалентной схемой Карно, может быть осуществлена путём изучения свойств её характеристических (собственных) параметров, полученных из соответствующей матрицы передачи

Потери в ячейке ЗС типа ЦСР можно учесть, например,

непосредственным введением в схему активных сопротивлений последовательно с каждой индуктивностью или шунтирующего активного сопротивления параллельно контуру резонатора, а также, предполагая что потери невелики, включить их в виде собственного затухания в постоянную передачи эквивалентного четырёхполюсника.

Таким образом, измерив или рассчитав эквивалентные параметры, ячейки ЗС типа ЦСР с повернутыми на  $180^0$  щелями связи, моделируемой эквивалентной схемой Карно и используя соотношения, можно построить её матрицу передачи и использовать затем в уравнениях возбуждения цепочки шестиполюсников.

## **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Аксенчик А.В., Кураев А.А., Сеницын А.К. Оптимизация параметров нерегулярной ЛБВ на цепочке связанных резонаторов в полосе частот // Радиотехника, -2001. -№4. -С.21-26.
2. Азов Г.А., Хриткин С.А. //Радиотехника и электроника. 2012. Т. 57. № 6. С. 686.
3. Материалы 20-той Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь, Севастополь: «Вебер» с. 127-128, 2010
4. Kino G.S., Hiramatsu Y., Ruetz J.A. Small-signal and large-signal theories for coupled-cavity TWT. //In Pros. 6th Int. conference onMOGA, 1966, Cambridge, England, p.49.
5. Мухин С.В., Ломакин О.Е., Солнцев В.А. Аналитическая резонаторно-волноводная модель замедляющей системы цепочка связанных резонаторов. //Тезисы доклада. XI Всесоюзная межвузовская конференция «Электроника СВЧ», Орджоникидзе, 1985, с. 24.
6. Шевчик В.Н. Кураев А.А. Общее дисперсионное уравнение лампы бегущей волны с периодической замедляющей системой.//

