ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЦЕПЕЙ УПРАВЛЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ КОММУТАЦИИ НА ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ЦЕПИ АНТЕННО-СОГЛАСУЮЩИХ УСТРОЙСТВ

М.А. Кот¹, И.Д. Павлов²

¹*Омский научно-исследовательский институт приборостроения, Омск, Российская Федерация*

²*Центральное конструкторское бюро автоматики, Омск, Российская Федерация*

Рассмотрена модель согласующего контура с полупроводниковыми элементами коммутации. Проведены моделирование работы согласующего контура и корректировка цепей управления. Предложен метод и с использованием разработанных моделей проведены вычислительные эксперименты, подтверждающие его эффективность при снижении влияния ячеек коммутации на высокочастотные цепи и организации согласующего контура для обеспечения работоспособности ячеек коммутации в коротковолновом диапазоне частот.

Ключевые слова: антенно-согласующее устройство, согласующий контур, ячейка коммутации, pin-диод, моделирование, КБВ.

RESEARCH OF THE INFLUENCE OF CONTROL CIRCUITS OF SEMICONDUCTOR ELEMENTS OF SWITCHING INFLUENCE ON HIGH-FREQUENCY CIRCUIT OF ANTENNA MATCHING DEVICE

M.A. Kot¹, I.D. Pavlov²

¹*Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation*

²*Central Design Bureau of Automation, Omsk, Russian Federation*

A model of a matching circuit with semiconductor switching elements is considered. The modeling of the matching circuit and the adjustment of control circuits are carried out. A method is proposed and, using the developed models, computational experiments are carried out, confirming its effectiveness in reducing the influence of switching cells on high-frequency circuits and organizing a matching circuit to ensure the operability of switching cells in the short-wave frequency range.

Keywords: antenna-tune unit, building-out network, switching cell, the pin-diode.

Введение

При проектировании радиопередающих устройств (РПДУ) коротковолнового (КВ) диапазона одним из основных требований является обеспечение заданного уровня выходной мощности на комплексную нагрузку. Для выполнения данного требования в состав РПДУ включается антенно-согласующее устройство (АнСУ), которое согласует комплексное сопротивление антенны с выходным сопротивлением усилителя мощности, обеспечивая номинальный режим его работы. Особенно актуально применение АнСУ для носимых РПДУ КВ диапазона, работающих с электрически короткими антеннами [1].

Основными тенденциями в развитии АнСУ являются повышение автономности работы и сокращение времени, необходимого для согласования сопротивления антенны и РПДУ. Для резонансных АнСУ известны методы сокращения времени согласования:

- параллельное включение нескольких согласующих контуров;
- применение быстродействующих элементов коммутации;
- оптимизация алгоритма согласования.

В работе рассмотрен вопрос, относящийся к применению быстродействующих элементов коммутации, среди которых минимальное время переключения обеспечивается pin-

диодами [2]. Наибольшее распространение pin-диоды получили в СВЧ диапазоне, где ВЧ цепи отделяются от цепей управления с помощью четвертьволновых вставок [3]. Для КВ диапазона частот изоляция цепей управления с помощью четвертьволновых вставок конструктивно нецелесообразна, поскольку значения длин волн лежат в диапазоне от 10 до 100 метров и, соответственно, минимальная длина четвертьволновой вставки равна 2,5 м. Поэтому при организации цепей управления для этого диапазона частот используются цепи на сосредоточенных элементах.

Основная сложность при использовании pin-диодов в перестраиваемых выходных высокочастотных (далее ВЧ) цепях РПДУ КВ диапазона связана с расчетом цепей управления, которые не должны оказывать влияния на ВЧ сигнал. Цель статьи – оценить и проанализировать влияние рассчитанных цепей управления pin-диодами на ВЧ сигнал.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать модель согласующего контура (СК);
- разработать модель полупроводниковой ячейки коммутации (ЯК);
- объединить модели СК и полупроводниковых ЯК;
- провести моделирование работы СК с ЯК на эквивалент антенны;
- на основании результатов моделирования провести анализ влияния цепей управления ЯК на ВЧ сигнал.

Постановка задачи моделирования

СК, работу которого необходимо промоделировать, представляет собой Г-образный четырехполосник, схема которого приведена на рис. 1. В состав четырехполосника входят наборы дискретных индуктивностей и емкостей, количество разрядов которых зависит от комплексного сопротивления нагрузки $Z_A(\omega)$ СК. В модели в качестве нагрузки принята штыревая антенна длиной 2,4 м. Исходя из входного сопротивления используемой антенны и диапазона рабочих частот 1,5–29,999 МГц, набор индуктивностей x_2 насчитывает 12 разрядов, а набор емкостей b_1 – 8 (методика расчета СК приведена в [1]). Каждый разряд в СК коммутируется с помощью ЯК, схема которой приведена на рис. 2.

Рис. 1. Схема согласующего контура

Рис. 2. Схема ЯК

Модель ЯК включает в себя сам полупроводниковый элемент – pin-диод (VD) и цепи управления. Цепи управления состоят из источника напряжения (E) и элементов фильтрации (C_{p1} , C_{p1} , L_{6BX} , $L_{6ВЫХ}$). Элементы цепей управления должны удовлетворять ряду усло-

вий [4]. Для входной цепи блокировочные дроссели и разделительные конденсаторы определяются из условий:

$$\frac{1}{\omega \cdot C_{p1}} \ll |Z_{\text{вх}}(\omega)|; \omega L_{\text{бвх}} \ll |Z_{\text{вх}}(\omega)|. \quad (1)$$

Требования к элементам цепей питания в выходных цепях:

$$\omega L_{\text{бвых}} \ll |Z_{\text{вых}}(\omega)|; \frac{1}{\omega \cdot C_{p2}} \ll |Z_{\text{вых}}(\omega)|. \quad (2)$$

Из условий (1) и (2) рассчитываются значения номиналов для элементов цепей питания рпн-диодами. Блокировочные индуктивности $L_{\text{б}}$ замыкают цепи питания по постоянному току. Из условия (1) входная блокировочная индуктивность определяется по формуле

$$L_{\text{бвх}} = \frac{50 \cdot |Z_{\text{вхУМ}}|}{\omega_{\min}}, \quad (3)$$

где $L_{\text{бвх}}$ – входная блокировочная индуктивность; $Z_{\text{вхУМ}}$ – выходное сопротивление усилителя мощности.

Из условия (2) выходная блокировочная индуктивность определяется по формуле

$$L_{\text{бвых}} = \frac{50 \cdot |Z_{\text{ант}}(\omega_{\min})|}{\omega_{\min}}, \quad (4)$$

где $L_{\text{бвых}}$ – выходная блокировочная индуктивность; $Z_{\text{ант}}(\omega_{\min})$ – входное сопротивление антенны на частоте $f_{\min}$.

Разделительная емкость C_p предназначена для исключения взаимного влияния соседних каскадов. Она должна иметь малое сопротивление в рабочем диапазоне частот, чтобы не создавать препятствия распространению ВЧ сигнала:

$$C_p = \frac{1}{0,005 \cdot \omega_{\min} \cdot |Z_{\text{экв}}|}. \quad (5)$$

где C_p – разделительная емкость; $Z_{\text{экв}}$ – эквивалентное сопротивление усилителя или антенны.

Результаты моделирования

Наибольшее влияние цепей управления на ВЧ сигнал проявляется на нижней частоте рабочего диапазона [4], поэтому моделирование проводилось на частоте $f_{\min} = 1,5$ МГц [5].

Модель СК, на базе которой было проведено исследование, приведена на рис. 3. В качестве нагрузки к СК подключен эквивалент штыревой антенны, который на выбранной частоте представляет из себя активное сопротивление и конденсатор. Входные сопротивления антенны в диапазоне частот, которые использовались при моделировании, приведены в таблице. Разряды элементов СК расположены по двоичному закону.

Для определения «эталонного» результата работы модели СК была проведена оценка КБВ на ее входе. В качестве эталонного результата принято значение КБВ на рабочей частоте, равное $0,97 \pm 0,03$. Эталонный результат моделирования работы СК приведен на рис. 4.

Рис. 3. Модель СК

Рис. 4. Эталонный результат моделирования работы СК

Далее в модель СК были добавлены ЯК. Вид модели СК с ЯК приведен на рис. 5. Для подключения каждого разряда из набора конденсаторов используется по одной ЯК, а для дополнительной изоляции индуктивностей применены две ЯК. Степень влияния ЯК оценивается по смещению резонансной характеристики СК по частоте. Результат работы модели СК с ЯК приведен на рис. 6 (пунктирная линия). Частота резонанса на входе СК с ЯК сдвинулась вверх на 133 кГц, максимальное значение КБВ = 0,617. Это указывает на то, что элементы цепей управления не обеспечивают требуемых эквивалентных сопротивлений для ВЧ сигнала.

Рис. 5. Модель СК с ЯК

Рис. 6. Результаты моделирования

Для снижения влияния ЯК на ВЧ сигнал была проведена корректировка элементов цепей управления. Ограничения при подборе элементов: соответствие ряду номинальных значений и объем не более 46 мм^3 . В результате корректировки номиналов блокировочные индуктивности достигли предельного значения по номиналу – 1 мГн, а разделительные конденсаторы – 160 пФ. Влияние откорректированных цепей управления проиллюстрировано на рис. 7 (пунктирная линия). Смещение резонансной характеристики составляет 3 кГц.

Рис. 7. Результаты моделирования

Далее для подтверждения утверждения о том, что влияние цепей управления наиболее выражено на нижней частоте рабочего диапазона была проведена проверка влияния цепей управления на ВЧ сигнал в диапазоне рабочих частот. Ее результаты приведены в таблице. Моделирование показало, что с ростом частоты влияние цепей управления на СК уменьшается.

Результаты моделирования

Частота, МГц	Отстройка СК от рабочей частоты, кГц	Частота, МГц	Отстройка СК от рабочей частоты, кГц
1,5	3	18	0
3	1	21	0
6	0,1	24	0
9	0,05	27	0
12	0	29,999	0
15	0		

Анализ результатов

Моделирование работы СК с полупроводниковыми ЯК и оценка их влияния на качество согласования показали, что для корректной работы СК на нижних частотах КВ диапазона рекомендуется применять блокировочные индуктивности номиналом до 1 мГн, которые имеют габарит 46 мм³. Полностью исключить влияние цепей управления в диапазоне частот 1,5–3 МГц не удалось. В диапазоне частот 3–29,999 МГц влияние цепей управления либо отсутствует, либо является незначительным (не более 100 Гц).

Значительное влияние цепей управления на ВЧ сигнал, которое было получено при первом моделировании работы СК с ЯК, объясняется некорректным выбором эквивалентных сопротивлений, используемых при проведении расчетов. Сложность определения эквивалентных сопротивлений для цепей управления ЯК объясняется тем, что для каждого разряда элементов СК эквивалентное сопротивление представляет величину, зависящую от сопротивления нагрузки на выбранной частоте и состояния оставшихся разрядов СК. Ручная обработка такого массива данных весьма трудозатратный процесс. Поэтому результаты расчета цепей управления являются скорее первичным приближением, нуждающимся в проверке и корректировке в процессе проведения моделирования.

Анализ результатов исследований, проводимых в этом направлении [6; 7], показал, что при работе с pin-диодами в КВ диапазоне номиналы блокировочных элементов имеют значения того же порядка, что и установленные в ходе моделирования, топология цепей управления одинакова.

В случае применения цепей управления с блокировочными индуктивностями номиналом 1 мГн с ростом рабочей частоты неизбежны трудности, связанные с пересечением частоты собственного резонанса элементов. Для преодоления данного эффекта может быть

использовано разделение согласующего контура на 2 или 3 отдельных контура (пример схемы такого СК приведен на рис. 8), предназначенных для работы на различных участках частотного диапазона. Это позволит достичь корректной работы СК с полупроводниковыми ЯК во всем диапазоне рабочих частот.

Рис. 8. Пример схемы СК с несколькими контурами

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабков В.Ю. Основы построения устройств согласования антенн. Л.: ВАС, 1980. 240 с.
2. Digi-Key Electronics: How and why to use pin diodes for RF switching / Digi-Key Electronics. Thief River Falls: Digi-Key Electronics, 2016. URL: [http:// www.digikey.com/en/articles/techzone/2016/dec/ how-and-why-to-use-pin-diodes-for-RF-switching](http://www.digikey.com/en/articles/techzone/2016/dec/how-and-why-to-use-pin-diodes-for-RF-switching) (дата обращения: 27.06.19).
3. Doherty Jr, W.E. The PIN Diode circuit designers handbook. Wat.: Microsemi Corporation, 1998. 137 p.
4. Шахильдян В.В. Радиопередающие устройства. М.: Радио и связь, 2003. 560 с.
5. ГОСТ 51903-2002. Передатчики радиосвязи стационарные декаметрового диапазона волн. М.: ГОССТАНДАРТ РОССИИ, 2002. 50 с.
6. Caverly R.H. Microwave and RF Semiconductor Control Device Modeling. L.: Artech House, 2016. 337 p.
7. Обертухина А.Б. Уменьшение времени перестройки радиопередающих устройств коротковолнового диапазона, работающих в режиме формирования сигналов с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты: дис. ... магистра. СПб., 2017. 64 с.