

УДК 621.372.832

## **Многоканальные переключатели СВЧ диапазона на повышенные уровни переключаемой мощности**

**Петров И.А.**

*Центральный научно-исследовательский радиотехнический институт  
имени академика А.И. Берга, ЦНИРТИ имени А.И. Берга, Москва, ул. Новая  
Басманная, 20, 105066, Россия  
e-mail: [petrov-sammos@yandex.ru](mailto:petrov-sammos@yandex.ru)*

### **Аннотация**

В статье анализируются условия создания многоканальных СВЧ переключателей с полупроводниковыми элементами на повышенные уровни переключаемой мощности. Анализируются достоинства и недостатки различных схем переключателей. Приводятся схемотехнические решения, позволяющие расширять диапазон рабочих частот, увеличивать уровни переключаемой мощности, уменьшать ослабление в открытых и увеличивать ослабление в закрытых каналах, уменьшать габариты.

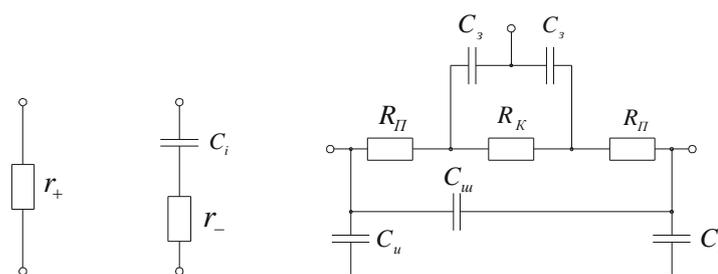
**Ключевые слова:** шлейфные структуры, переключатели, полупроводниковые элементы.

Управляющие устройства СВЧ диапазона с полупроводниковыми элементами предназначены для управления амплитудой и фазой сигналов, переключения сигналов по различным каналам. На их основе строятся различные

устройства: выключатели высокочастотные (ВВЧ), аттенюаторы электрически регулируемые, многоканальные переключатели и переключающие матрицы, фазовращатели. Управляющим устройствам посвящено достаточно большое количество работ, но остановимся только на некоторых из них, которые, по мнению автора, внесли определенный вклад в развитие теории и практической реализации данных устройств. Первые работы по управляющим устройствам появились в 50 – е годы 20 века, например [1], далее работы [2-4], из отечественных отметим работы [5-13].

Первоначально в управляющих устройствах применялись полупроводниковые элементы (ПЭ) не предназначенные для целей управления, это были диоды с p-n переходами, диоды Ганна, лавинно-пролетные диоды (ЛПД) и другие. В настоящее время в управляющих устройствах, в том числе многоканальных переключателях, в качестве ПЭ применяются p-i-n диоды и полевые транзисторы с затвором Шоттки.

Эквивалентная схема бескорпусного p-i-n диода в открытом и закрытом состояниях представлены на рис. 1а и рис. 1б, соответственно, где:  $r_+$  и  $r_-$  резистивные сопротивления полупроводниковой структуры,  $C_i$  -емкость структуры [6].



а)                      б)                      в)

Рис. 1. Эквивалентные схемы бескорпусных ПЭ.

Эквивалентная схема полевого транзистора с затвором Шоттки, представленная на рис. 1в, более сложная [9, 10]. Но эта схема, в зависимости параллельно или последовательно транзистор включен в линию передачи, может быть пересчитана и приведена к эквивалентной схеме р-і-п диода. Поэтому, именно схемы р-і-п диода будем использовать при анализе различных вариантов построения переключателей.

Из общей теории управляющих устройств [5, 6] известно, что независимо от того, последовательно или параллельно ПЭ включен в линию передачи, при «оптимизированном» включении ослабление, вносимое устройством в открытом и закрытом состояниях, связаны с параметрами полупроводниковой структуры следующим соотношением

$$\frac{\sqrt{L_3} - 1}{\sqrt{L_{\Pi}} - 1} = \frac{1}{(2\pi f)^2 C_i^2 r_+ r_-} = K_3, \quad (1)$$

где  $L_{\Pi}$  - ослабление, вносимое переключающим устройством в открытом состоянии;

$L_3$  - ослабление, вносимое переключающим устройством в закрытом состоянии;

$f$  - рабочая частота устройства;

$K_3$  - так называемое, качество полупроводникового элемента.

Соотношение (1) верно только для «оптимизированного» включения полупроводникового элемента в линию передачи, то есть, когда реактивные параметры полупроводникового элемента, тем или иным способом компенсированы соответствующими цепями согласования. Чем меньше  $C_i$ ,  $r_+$  и  $r_-$ , тем больше качество ПЭ на заданной частоте. Однако, требование уменьшения емкости, как правило, приводит к увеличению  $r_+$  и  $r_-$ , а следовательно,  $K_{\text{э}}$  может и не увеличиваться. Уменьшение  $C_i$  уменьшает размеры ПЭ, тем самым снижает допустимую мощность рассеивания  $P_{\text{расс.д.}}$ .

Другим обобщенным параметром ПЭ является критическая частота  $f_{\text{кр}}$ , это частота

на которой  $K_{\text{э}} = 1$  и определяется следующим выражением

$$f_{\text{кр}} = \frac{1}{2\pi C_i \sqrt{r_+ r_-}}. \quad (2)$$

Качество и критическая частота ПЭ характеризуют его предельные возможности.

Мощность, рассеиваемая в полупроводниковых элементах, не должна превышать максимально допустимую мощность рассеивания  $P_{\text{расс.д.}}$ , которая определяется максимальным перегревом полупроводниковой структуры. Для кремниевых р-і-п диодов максимальный перегрев полупроводниковой структуры  $\theta_{\text{макс}}$  лежит в пределах до 150-180°C. В этом случае максимально допус-

тимая мощность рассеивания при непрерывном СВЧ сигнале, связана с максимальным перегревом полупроводниковой структуры следующим выражением

$$\theta_{\max} = \frac{8}{\pi^3} \cdot \frac{k}{\lambda_T} \cdot \frac{d}{s} \cdot P_{\text{расс.д.}} \quad (3)$$

где,  $\theta_{\max}$  - максимальный перегрев полупроводниковой структуры,  $\lambda_T$  – коэффициент теплопроводности,  $k$  – постоянная Больцмана,  $s, d$  – площадь и толщина полупроводниковой структуры. Из формулы (3) видно, что увеличение отношения  $s/d$  приводит к увеличению максимально допустимой мощности рассеивания  $P_{\text{расс.д.}}$ . Однако, увеличение поперечных размеров полупроводникового элемента и уменьшение толщины  $i$ -слоя увеличивает емкость полупроводниковой структуры  $C_i$ , которая ограничивает верхнюю граничную частоту переключающего устройства.

Таким образом, чем большую емкость полупроводниковой структуры может компенсировать схема переключающего устройства, тем меньше ослабление в открытых каналах, больше развязка и более высокий уровень коммутируемой СВЧ мощности можно получить в этом устройстве.

Многоканальные переключатели могут быть выполнены с последовательным, последовательно-параллельным и параллельным включением ПЭ в линию передачи. Каналы в переключателях могут разветвляться как из одной точки, так и состоять из последовательно разветвляющихся переключательных групп [7, 8], в последнем случае они имеют более широкую полосу рабочих частот.

На рис. 2. приведены частотные характеристики ослабления одного последовательно включенного в линию передачи ПЭ с параметрами  $C_i = 0,12$  пФ и

$r_+ = r_- = 1.5$  Ом. Кривая 1

соответствует открытому и кривая 2 закрытому состояниям ПЭ.

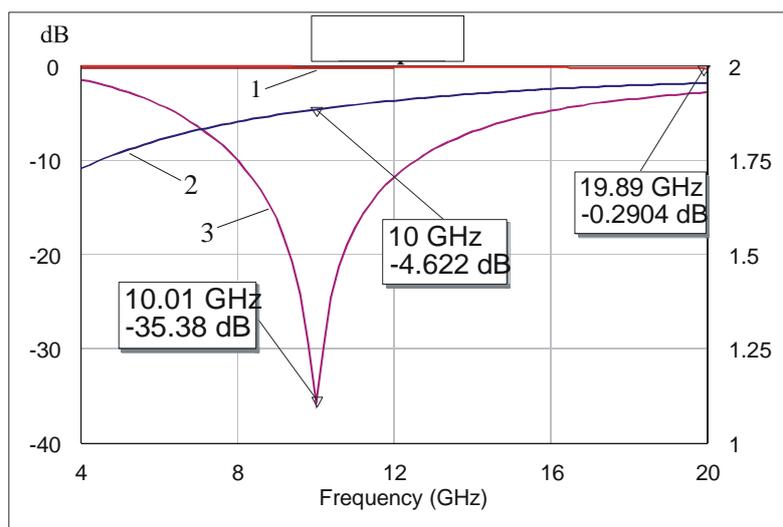


Рис. 2. Частотные характеристики последовательного ПЭ.

Кривая 2 рассчитана для неоптимизированного включения ПЭ, так как емкость  $C_i$  никаким образом не компенсируется и соотношение (1) не выполняется. В результате, ослабление вносимое закрытым ПЭ, с ростом частоты уменьшается и на частоте 10 ГГц становится менее 5 дБ. Для компенсации реактивного емкостного сопротивления ПЭ, параллельно можно подключить индуктивность для получения параллельного колебательного контура. Однако, на практике оптимизированное включение ПЭ последовательно в линию передачи, в большинстве случаев, не используется. Объясняется это двумя фактора-

ми. Во-первых, подключение параллельной индуктивности достаточно сложно реализовать, а к р-і-п диоду практически невозможно, из-за необходимости подачи на него управляющего напряжения. Во-вторых, оптимизированное включение носит резонансный характер и возможно только на одной частоте рис. 2 (кривая 3), при отклонении от которой развязка резко уменьшается.

При создании широкополосных и сверхширокополосных управляющих устройств в подавляющем большинстве используется неоптимизированное последовательное включение ПЭ в линию передачи. Полупроводниковые диоды и транзисторы постоянно совершенствуются с целью снижения емкости полупроводниковой структуры. Например, серийно выпускаемый р-і-п диод 2A553A-3 имеет емкость порядка 0,03 пФ. Для увеличения ослабления в закрытом состоянии в линию необходимо включать несколько ПЭ. Переключатели

последовательным включением ПЭ не могут коммутировать повышенные уровни мощности, за исключением достаточно низких частот.

На рис. 3 приведена эквивалентная схема переключателя 1x4 с последовательно-параллельным включением ПЭ [11], в котором первый канал открыт, а остальные закрыты.

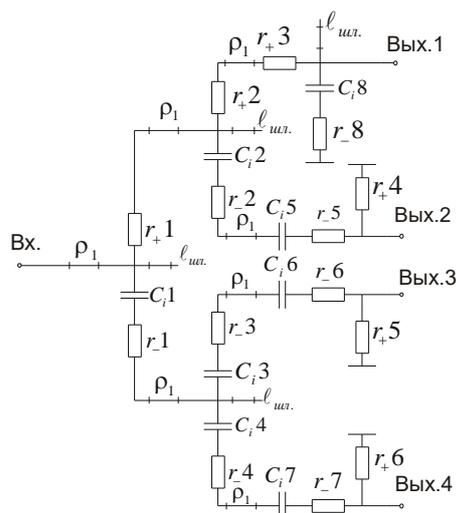


Рис. 3. Эквивалентная схема.

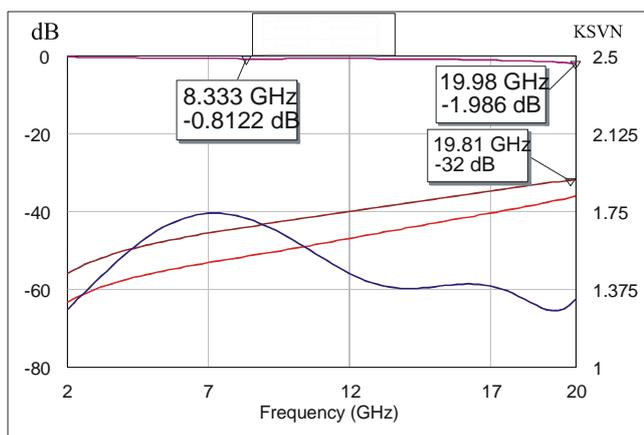


Рис. 4. Частотные характеристики переключателя.

Каналы разветвляются с последовательным включением ПЭ. На выходах, за вторым ПЭ после последнего разветвления, включены параллельные ПЭ. Входные емкостные проводимости закрытых каналов и параллельного ПЭ, подключенные к линии передачи открытого канала, значительно ограничивают верхнюю рабочую частоту. Для их компенсации, линии передачи переключателя выполнены в виде каскадного соединения четырехполюсников с разомкнутыми шлейфами. Частотные свойства таких структур, как и структур с

короткозамкнутыми шлейфами, подробно описаны в работе [13]. Точки разветвления каналов и точки подключения параллельных ПЭ выбираются в точках подключения разомкнутых шлейфов. Уменьшая длину шлейфов  $\ell_{шл}$ , подключенных в этих точках, можно выполнить условие  $C_{исх.шл.} = C_{ук.шл.} + C_{эк.зк}$ , т.е. суммарная емкость укороченного шлейфа и емкость закрытого канала (или параллельного диода) должна быть равна емкости шлейфа исходной структуры.

На рис. 4 приведены частотные характеристики такого переключателя, рассчитанные в диапазоне от 2 до 20 ГГц. Расчеты проводились для  $C_i = 0,2$  пФ,  $r_+ = r_- = 1,5$  Ом. Из приведенных характеристик видно, что ослабление в открытом канале не превышает 2 дБ,

КСВН входа не более 1,7, развязка на частоте 20 ГГц не менее 36 дБ. Для увеличения развязки на выходах можно включить дополнительные параллельные ПЭ на расстоянии  $\lambda/4$  друг от друга.

Благодаря применению в качестве линии передачи каскадной структуры с разомкнутыми шлейфами удается компенсировать емкостные проводимости закрытых каналов и параллельных ПЭ, следовательно применять ПЭ с меньшими  $r_+$  и  $r_-$ , с большей  $P_{расс.д.}$ . Такие переключатели могут коммутировать уровни мощности в несколько десятков ватт.

Рассмотрим переключатели с параллельным включением ПЭ. В работе [3] для компенсации емкостей параллельных ПЭ, предложено использовать полосовой фильтр с четвертьволновыми короткозамкнутыми шлейфами и свя-

зьями В работе [4] такой фильтр был применен для создания  $p-i-n$  диодного переключателя. Переключатели на основе полосового фильтра реализуются на симметричной полосковой линии передачи и часто применяются для переключения высоких (до сотен ватт) уровней мощности в непрерывном режиме. Для создания подобных переключателей также можно использовать структуру, состоящую из каскадного соединения  $\Pi$  – образных широкополосных четырехполосников с короткозамкнутыми шлейфами. Как показано в работе [13], коэффициент перекрытия по диапазону рабочих частот не будет превышать 2,2.

На рис. 5 приведена эквивалентная схема открытого канала переключателя  $1 \times 4$  с параллельным включением ПЭ в линию передачи [8]. Первый канал открыт остальные закрыты, два последних канала условно не показаны.

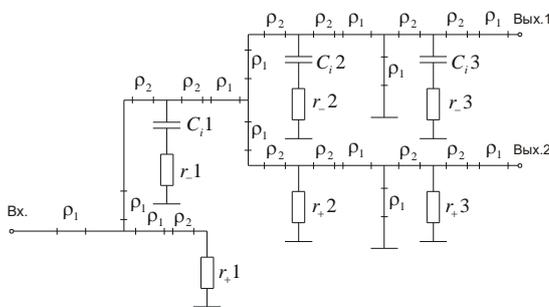


Рис. 5. Эквивалентная схема.

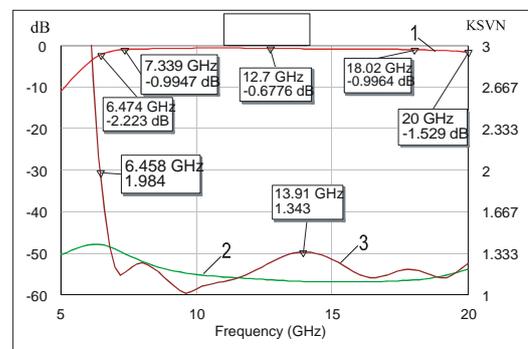


Рис. 6. Частотные характеристики переключателя.

реключателя.

В качестве исходной здесь применена структура, состоящая из каскадного соединения Т – образных широкополосных четырехполюсников с короткозамкнутыми шлейфами

[8, 13]. Коэффициент перекрытия по диапазону рабочих частот такого переключателя может достигать 3,5. Для расширения частотного диапазона нормированное волновое сопротивление отрезков, обозначенных  $\rho_1$  менее 0,8. Отрезки, обозначенные  $\rho_2$ , имеют нормированное волновое сопротивление более 1 и служат для компенсации емкостей ПЭ, подключенных к линии передачи открытого канала. На рис. 6 приведены частотные характеристики переключателя, рассчитанные от 5 до 20 ГГц. Расчеты проводились для ПЭ с параметрами:  $C_i = 0.2$  пФ,  $r_+ = r_- = 1.5$  Ом, допустимая мощность рассеивания  $P_{\text{дон. рас.}} = 2$  Вт. Примерно такие параметры имеет р – i – n диод 2A546A-5. В диапазоне от 6,5 до 18 ГГц КСВН входа переключателя не превышает 1,4, ослабления открытого канала менее 1 дБ, развязка соседнего канала более 50 дБ.

На рис. 7 приведены графики мгновенных напряжений на активных сопротивлениях диодов при СВЧ сигнале на входе мощностью 1 Вт на частоте 13 ГГц. Кривые 1 и 2 соответствуют напряжениям на резисторах  $r_{+1}$  и  $r_{+2}$ , а кривые 3, 4 и 5 на резисторах  $r_{-1}$ ,  $r_{-2}$  и  $r_{-3}$ .

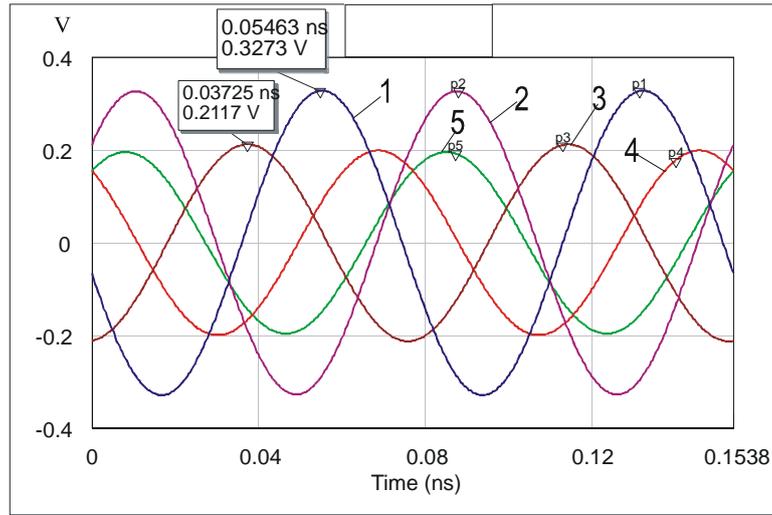


Рис. 7. Мгновенные значения напряжений на  $r_+$  и  $r_{-1}$ .

Максимальное мгновенное напряжение на сопротивлении  $r_+$  равно 0,33 В. Аналогично можно определить напряжения на других частотах, например, 7 и 20 ГГц. Эти напряжения, соответственно, равны 0,55, и 0,44 В. Зная максимальные напряжения на сопротивлениях ПЭ, можно определить коэффициент  $\eta$ , характеризующий, какая часть от входной мощности рассеивается на сопротивлении. Этот коэффициент равен

$$\eta = P_{\text{расс.д.}} / P_{\text{вх}} = U_{\text{макс}}^2 / 2rP_{\text{вх}}, \quad (4)$$

где,  $P_{\text{расс.д.}}$  -мощность, рассеиваемая на диоде,  $P_{\text{вх}}$  -мощность на входе устройства,  $U_{\text{макс}}$  -мгновенное максимальное значение напряжения на сопротивлении. Учитывая, что напряжения  $r_+$  получены при  $P_{\text{вх}} = 1$  Вт, коэффициент  $\eta$  для частот 7, 13 и 20 ГГц будет, соответственно, равны 0,1, 0,036 и 0,065. Зная коэффициент  $\eta$  и допустимую мощность рассеивания  $P_{\text{расс.д.}}$  ПЭ,

можно рассчитать допустимую мощность на входе переключателя по следующей формуле

$$P_{вх. доп.} = P_{расс. д.} / \eta_{макс.}$$

(5)

Таким образом, допустима коммутируемая мощность на входе переключателя, на соответствующих частотах, равна 20, 55 и 31 Вт. Максимальную мощность переключатель коммутирует в центральной части рабочего диапазона, на краях диапазона коммутируемая мощность уменьшается, но даже на частоте 20 ГГц не менее 30 Вт. При включении в каждую точку двух ПЭ, например, выполнив переключатель на симметричной полосковой линии, сопротивления  $r_+$ ,  $r_-$  и коэффициенты  $\eta$  уменьшатся в два раза, мощность  $P_{расс. д.}$  увеличится в два раза. Следовательно, такой переключатель в центральной части частотного диапазона будет иметь  $P_{вх. доп.}$  более 200 Вт.

### **Выводы:**

1. Переключатели с последовательным включением ПЭ легко реализуются на полосковых линиях передачи, но развязка в закрытом канале может резко уменьшаться с ростом частоты. Для увеличения развязки необходимо применять ПЭ с малой емкостью и включать в линию несколько ПЭ, однако при этом увеличивается ослабление в открытом канале. Переключатели последовательным включением ПЭ не могут коммутировать повышенные уровни мощности, за исключением достаточно низких частот.

2. В переключателях с последовательно-параллельным включением ПЭ легко получить высокую развязку в закрытых каналах. Благодаря применению в качестве линии передачи каскадной структуры с разомкнутыми шлейфами удается компенсировать емкостные проводимости закрытых каналов и параллельных ПЗ, следовательно применять ПЭ с меньшими  $r_+$  и  $r_-$ , с большей  $P_{\text{расс.д.}}$ . Такие переключатели могут коммутировать уровни мощности в несколько десятков ватт.

3. Переключатели с параллельным включением ПЭ являются наиболее оптимальными с точки зрения получения минимального ослабления в открытом канале и максимальной развязки в закрытом. При использовании в качестве исходных структур ППФ или каскадного соединения П-образных шлейфных четырехполюсников, коэффициент перекрытия по диапазону частот около 2. При использовании каскадного соединения Т-образных шлейфных четырехполюсников, коэффициент перекрытия по диапазону частот до 3,5.

### **Библиографический список**

1. Armistead M.A., Spencer E.G. and Hatcher R.D. Microwave Semiconductor Switch. // Proc. IRE, vol. 44, p. 1875, December, 1956.
2. Carver R.V. Theory of TEM Diode Switching. // IRE Trans. on Microwave Theory and Techniques., vol. MTT-9, 1961, № 3, pp.224-238.

3. Ficher R.F. Broadband Microwave Diode switches // IEEE Trans. On Microwave Theory and Techniques. 1965. v. MTT-13. № 5. P. 706-709.

4. White J.E., Mortenson K.E. Diode SRDT Switch at High Power With Octave Microwave Bandwidth // IEEE Trans. On Microwave Theory and Techniques. 1968. v. MTT-16. № 1.

5. СВЧ устройства на полупроводниковых диодах. Проектирование и расчет. / Под ред. И.В. Мальского, Б.В. Сестрорецкого. - М.: Сов. Радио, 1969. - 351 с.

6. Либерман Л.С., Сестрорецкий Б.В., Шпирт В.А., Якубень Л.Н. Полупроводниковые диоды для управления СВЧ мощностью // Радиотехника, 1972, т.27, № 5. С. 16-21.

7. Воробьевский Е.М. Многоканальный переключатель. Авторское свидетельство, №451150, H01p 1/10. Заявлено 06.04.1972. Опубликовано 25.11.1975, бюллетень №43.

8. Петров И.А. Многоканальный переключатель. Авторское свидетельство № 881902 H01P 1/15.. Приоритет от 06.09.1976. Опубликовано 15.11.1981, бюллетень № 42.

9. Чижов А.И., Орлов О.С. Расчет и анализ характеристик широкополосных дискретных фазовращателей // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ, 1983. Вып. 5. С. 13-16.

10. Орлов О.С., Чижов А.И., Фефелов А.Г., Прудовский В.И. Выключатели СВЧ на полевых транзисторах с затвором Шоттки // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1986. Вып.3. С.50-54.

11. Петров И.А. Многоканальные СВЧ переключатели с полупроводниковыми элементами на основе широкополосных согласующих структур. // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2011. Т. 14. № 4. С. 60-66.

12. Лобанов Б.С., Петров И.А., Неганов В.А. Структурный синтез СВЧ устройств с использованием шлейфных четырехполюсников. Электронный журнал «Журнал радиоэлектроники». ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. 2014. № 1. С.15. <http://jre.cplire.ru/jre/contents.html>.

13. Петров И.А. Частотные свойства реактивных симметричных четырехполюсников на основе шлейфных структур. Электронный журнал «Журнал радиоэлектроники». ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. 2014. № 1. С. 21. <http://jre.cplire.ru/jre/contents.html>.