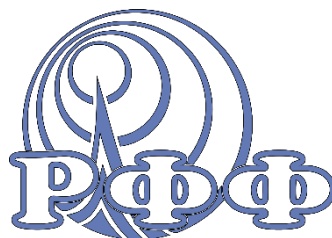




Национальный
исследовательский

**Томский
государственный
университет**



Радиофизический факультет



9-я Международная научно-практическая конференция
Актуальные проблемы радиофизики
АПР-2021

Сборник трудов конференции

при поддержке:



20-22 октября 2021 года
г. Томск

Устойчивость синхронных режимов системы двух связанных автогенераторов

Новиков Сергей Сергеевич

Костерова Влада Сергеевна

Томский государственный университет

E-mail: nss@sibmail.com, ysk727@vandex.ru

ВВЕДЕНИЕ

В системе двух связанных автогенераторов в зависимости от величины и характера взаимной связи могут возникать различные виды колебаний: как классические так и некогерентные [1]. Свойства и особенности реализации синхронных режимов в автоколебательных системах со многими степенями свободы различного типа хорошо изучены и допускают возможность классификации. Такая классификация, например, может быть проведена по схемным признакам, учитывающим тип генерирующих структур и элементов канала взаимной связи, в том числе: отрезков линий передачи, элементов резонансных объемов генерирующих систем, способы введения диссипативных элементов-нагрузок, симметрию системы в целом [2, 3, 4]. Вместе с тем, попытки классификации должны опираться также на критерии, вытекающие из представлений об устойчивости (или неустойчивости) синхронных движений. Так, оптимальными с точки зрения устойчивости синхронных режимов являются так называемые резистивные связи, обусловленные введением в каналы связи автогенераторов диссипативных элементов-нагрузок. В зависимости от типа (знака) резистивной связи в системе двух автогенераторов устойчивы либо синфазные, либо противофазные (или близкие к ним) синхронные колебания. В случае чисто реактивной связи эти режимы устойчивы одновременно, что вызывает нестабильность. На практике, особенно в области сверхвысоких частот, полные цепи связи кроме внешних элементов (отрезков линий передачи, нагрузок) включают в себя частотнозависимые элементы выходных цепей самих автогенераторов. Поэтому реальные цепи связи обладают резонансными свойствами, влияние которых на устойчивость необходимо учитывать [3]. Как показывает опыт, сильные резонансные свойства каналов связи системы двух автогенераторов могут кардинально изменить поведение системы. Оценка влияния резонансных свойств на устойчивость синхронных колебаний была проведена в [5]. Позднее в [6, 7, 8] было теоретически и экспериментально показано, что при сильных резонансных связях «базовые» синхронные режимы «теряют» устойчивость (разрушаются) и на их месте возникает режим динамического хаоса. Существенная особенность модели состоит в том, что каждый из автогенераторов в автономном режиме является абсолютно стабильной одночастотной системой.

Одним из важных элементов исследования когерентных многогенераторных систем является анализ динамики переключений синхронных движений при изменении управляющих параметров. В данной работе методом численного моделирования исследуются динамические процессы развития неустойчивостей в системе двух автогенераторов с сильной резонансной связью. С использованием аналитического критерия неустойчивости синфазных колебаний оцениваются параметрические границы областей неустойчивости базовых синхронных режимов.

РЕЗОНАНСНЫЕ СВОЙСТВА ЦЕПЕЙ СВЯЗИ, КРИТЕРИЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ СИНФАЗНОГО РЕЖИМА

В качестве примера типичных резонансных свойств на рис.1 приведен [1] профиль частотных характеристик проводимости связи $y_{12}(j\omega)$ простейшей цепи, изображенной на вставке. В соответствии с этой схемой автогенераторы соединяются друг с другом и с общей нагрузкой g_n отрезками линии передачи с электрическими длинами θ_1 и θ_2 и с волновой проводимостью g_0 . Для данной схемы $\alpha_s = \theta_1 + \theta_2 \equiv \theta_2 - \omega\tau$, где τ – время распространения сигнала в канале связи; $\theta = \theta_2 - \theta_1$ – параметр несимметрии; $g_n = 2g_0$ проводимость согласованной общей нагрузки. Резонансные свойства проводимости связи непосредственно вытекают из формулы [2]

$$y_{12} = \frac{-2s}{(\cos \alpha_s - 2s \cos \theta) + j \sin \alpha_s} g_0 \quad (1)$$

где s и α_s модуль и аргумент элемента матрицы рассеяния $s_{12} = s \cdot \exp(-ja_s)$. Величина s лежит в интервале (0-0.5), причем верхнее значение соответствует отсутствию потерь (погонных) в отрезках линии.

Характеристика $\operatorname{Re} y_{12}(j\omega)$ является знакопеременной функцией частоты. Область частот последовательного резонанса, где $\operatorname{Re} y_{12} < 0$, соответствует резистивной связи первого типа, при которой устойчивы синфазный или близкие к нему режимы колебаний. В области частот с резистивной связью второго типа ($\operatorname{Re} y_{12} > 0$) устойчивы противофазный или близкие к нему режимы.

В задаче устойчивости [1] резонансные свойства описываются параметром

$$C_{12} = d(\operatorname{Im} y_{12}(j\omega))/d\omega \Big|_{\omega_0} \quad (2)$$

Сильная резонансная связь первого типа реализуется в узких частотных интервалах вблизи $\alpha_s \approx 2\pi, 4\pi, \dots$ где $\operatorname{Re} y_{12} < 0$. В этих интервалах в случае почти симметричной цепи ($\theta \approx 0$) и $s \rightarrow 0.5$ параметр C_{12} положителен ($C_{12} > 0$) и может достигать теоретически сколь угодно больших значений. При выполнении критерия

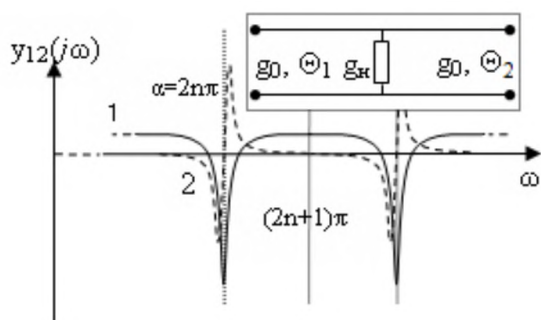


Рис.1 Резонансные свойства проводимости связи, 1 – Rey_{12} ; 2 – Imy_{12} [9]

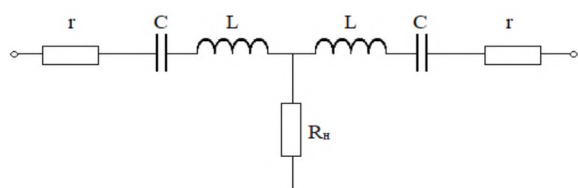


Рис.2 Схема резонансной цепи связи

характеристики описываются аналитическим выражением

$$y_{12}(j\omega) = -\frac{1}{(2 + \frac{z(j\omega)}{R_n})z(j\omega)} \quad (4)$$

где

$$z(j\omega) = r + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) = r + jz(\omega),$$

комплексное сопротивление последовательных RLC -контуров.

Профиль частотных характеристик показан на рис.3. Как видно, $Rey_{12}(j\omega)$ является знакопеременной функцией частоты. Характер связи в резонансной области 2 соответствует резистивной связи 1-го типа: $Rey_{12} < 0$. На резонансной частоте $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ проводимость связи равна действительной отрицательной величине $y_{12}(j\omega_0) = -1/(2 + \frac{r}{R_n})r$. Ширина резонансной области определяется соотношением

$$\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2 = (2R_n + r)r \quad (5)$$

Из (5) следует, что ширина резонансной области сужается при уменьшении r . Очевидно также, что уменьшение резонансной частоты ω_0 путем увеличения индуктивности L сужает указанную область, что соответствует увеличению добротности резонанса. При значительной отстройке частот генераторов от резонанса связи (области 1 и 3) имеем $Rey_{12} > 0$ и $Imy_{12} \neq 0$. При данном типе реальной части проводимости связи устойчивы противофазные колебания.

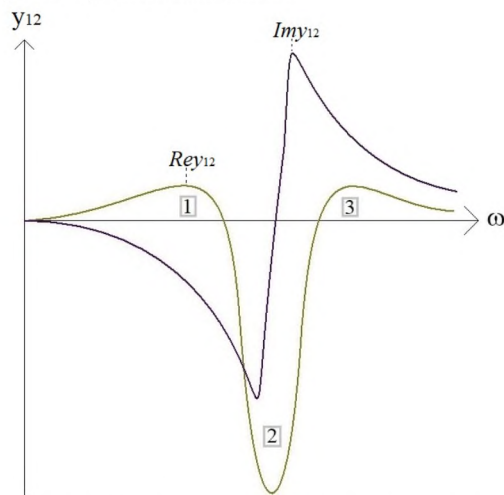


Рис.3 Частотные характеристики цепи

Поведение мнимой части проводимости связи ($Imy_{12}(j\omega)$) в области последовательного резонанса подобно рассмотренному выше примеру. Параметр C_{12} на резонансной частоте ω_0 определяется аналитически и равен

$$C_{12} = \frac{L}{r^2} \quad (6)$$

Характерно, что (6) с точностью до коэффициента совпадает с выражением, приведенным в [5] в качестве частного примера. Представляет интерес управление устойчивостью синфазных колебаний в резонансной области 2. В соответствии с (3) и (6) устойчивость синфазных колебаний при настройке связи в резонанс может быть получена для любого L путем выбора достаточно большого значения омических потерь r . И, наоборот, при достаточно малых потерях выполняется критерий (3), и синфазный режим становится неустойчивым. Следует отметить, что в пределах области 2 параметр C_{12} изменяется и сохраняет положительный знак в интервале

частот, который приближенно оценивается как

$$\omega_s \approx \omega_0 \pm \frac{r}{2L}. \quad (7)$$

Таким образом, при типичных добротностях 100-200 указанный частотный интервал весьма узкий.

В то же время, как следует из (7), с увеличением индуктивности ширина указанного интервала уменьшается пропорционально $1/L$, тогда как положение резонанса – пропорционально $1/\sqrt{L}$. В таком случае можно ожидать, что отстройка резонанса вниз в пределах области резонанса путем увеличения управляющей индуктивности будет сопровождаться расширением диапазона частот, в котором выполняется критерий неустойчивости синфазных колебаний (3).

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ СИНХРОННЫХ РЕЖИМОВ

Исследуемая схема (рис.4) представляет собой два транзисторных автогенератора, соединенных друг с другом через резонансную цепь связи. Автогенераторы собраны по схеме емкостной трехточки (цепи питания транзисторов на рис.4 не показаны). Схема резонансного четырехполюсника связи состоит из последовательных колебательных контуров r, C, L и полностью соответствует рис.2. Система реализована в программе NI Multisim. Частота работы автогенераторов порядка 540 кГц, которая задается элементами колебательных контуров $C_{1,2}, L_{1,2}$. Для исследования временной динамики колебаний в синфазном и противофазном режимах в цепь базы в качестве начальных условий вводились ступенчатые напряжения одинаковых (++) или разных (+-) знаков.

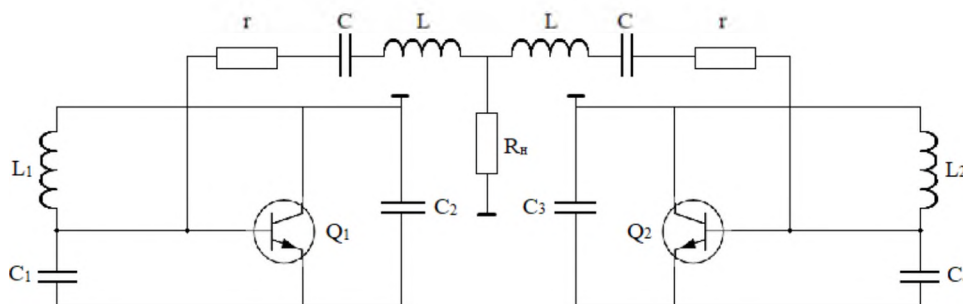


Рис. 4. Высокочастотная схема системы связанных автогенераторов с резонансной связью

В ходе экспериментов на двух параллельных осциллографических каналах наблюдались колебательные напряжения, развиваемые автогенераторами в процессе их возбуждения и подавления. Основным синхронным режимом является синфазный режим, соответствующий суммированию мощностей автогенераторов в общей нагрузке R_n . Его устойчивость реализуется при настройке цепи связи в область резонанса 2 (рис. 3), где $\text{Re}y_{12}(j\omega) < 0$ и только при достаточно больших величинах r . В случае полной симметрии схемы и при идентичности автогенераторов частота стационарных синхронных колебаний в основном режиме равна парциальным частотам автогенераторов. Противофазный режим при резонансной настройке из-за больших вносимых (со стороны r) потерь существовать не может. Условия устойчивости противофазных колебаний реализуются в областях 1 и 3 (рис. 3), где $\text{Re}y_{12}(j\omega) > 0$, то есть при значительной отстройке резонанса связи. Такая отстройка, с одной стороны, может быть задана путем смещения резонансной частоты контуров связи относительно частот генераторов. С другой стороны, отстройка от резонанса возникает автоматически за счет «шунтирования» резонансных систем генераторов реактивными элементами цепи связи при динамическом коротком замыкании сопротивления нагрузки R_n . Последняя ситуация всегда возникает при переходе системы в противофазный режим в случае неустойчивости синфазных колебаний посредством нарастающей автомодуляции (рис. 5-7).

Условия одновременной устойчивости синфазных и противофазных колебания выполняются на краях области 2, где $\text{Re}y_{12}(j\omega) \approx 0$, и проводимость связи характеризуется значительной реактивной составляющей. В численном эксперименте эти типы колебаний реализуются путем смены начальных условий (++) или (+-).

В рамках проведенных исследований основной задачей являлось доказательство критерия разрушения синфазных колебаний (3) при высокой добротности резонанса связи. При выполнении эксперимента необходимо было учесть следующее обстоятельство. Резонансная частота f_0 цепи связи r, C, L определяется однозначно, однако полная цепь связи включает в себя также элементы выходных цепей самих автогенераторов и элементы развязки по питанию. Поэтому на предварительном этапе необходимо было путем подбора величин элементов контура локализовать резонанс связи, поскольку оценка параметра $C_{12} = L/r^2$ справедлива только для резонансной частоты. Как оказалось, такая настройка не является однозначной, так как изменение управляющей индуктивности L вызывает как изменение резонансной частоты ω_0 , так и параметра C_{12} . Кроме того, такая настройка могла опираться только на косвенные признаки, такие как устойчивость или неустойчивость

синхронных режимов и время перестройки одного режима в другой. Оценка времени переходных процессов существенно усложнила исследование, но было понятно, что только при настройке цепи связи в резонанс с частотами автогенераторов реализуется возможность однозначного управления параметром C_{12} с помощью омических потерь r . При этом мы придерживались версии, что чем больше параметр C_{12} , тем выше степень неустойчивости и тем быстрее завершается переход от неустойчивых синфазных колебаний к противофазным.

В результате описанной процедуры были выбраны $L=1020$ нГн $C=80$ нФ. Далее была проведена серия экспериментов при последовательном изменении сопротивления r в пределах 0,0001-0,01 Ом. При этом путем прямого наблюдения осциллограмм оценивалось время перехода от неустойчивого синфазного режима к устойчивому противофазному. В интервале 0,0001–0,008 Ом синфазные колебания, возбуждаемые начальными условиями (++) неустойчивы и система переходит в противофазный режим (рис.5-7) с частотой порядка 690 кГц. Перестройка фаз сопровождается характерной автомодуляцией, которая начинает развиваться после выхода активных элементов (транзисторов) в нелинейный режим. Далее «глубина автомодуляции» нарастает, достигает 100 % и асимптотически уменьшается до нуля. Следует отметить характерный признак переходного процесса: огибающие колебаний находятся в противофазе; можно сказать, что одно колебание попеременно подавляет другое.

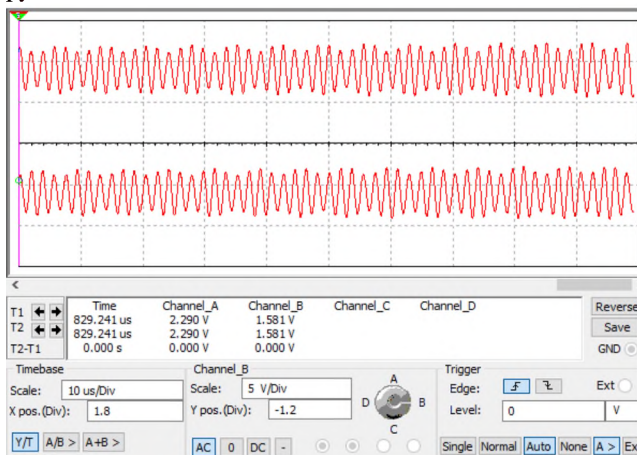


Рис.5. Осциллограммы колебаний автогенераторов – начало автомодуляции; $L=1020$ нГн $C=80$ нФ

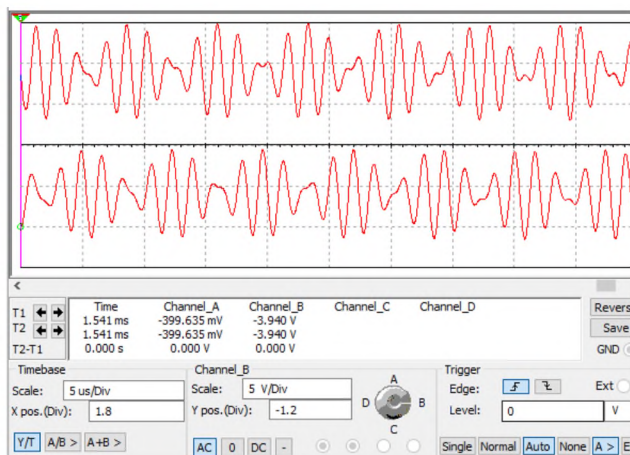


Рис.6. Осциллограммы колебаний автогенераторов – процесс автомодуляции; $L=1020$ нГн $C=80$ нФ

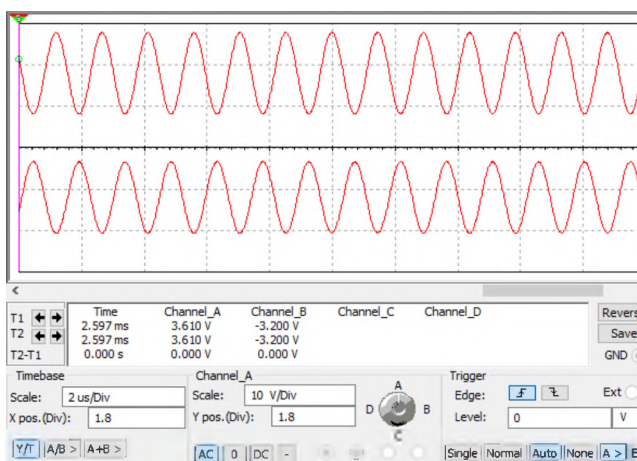


Рис.7. Осциллограммы колебаний – противофазный режим работы; $L=1020$ нГн $C=80$ нФ

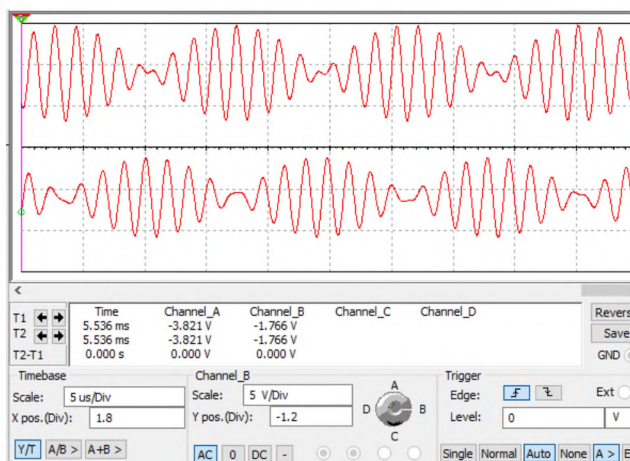


Рис. 8. Осциллограммы колебаний автогенераторов – переход в противофазный режим; $L=4020$ нГн $C=20$ нФ

Время перехода в указанном интервале изменяется от 1,5 мс до, примерно, 50–60 мс. На этом основании можно предположить, что вблизи верхнего предела $r \approx 0,008$ Ом имеет место $C_{12} = L/r^2 \geq C$, и система находится на границе неустойчивости. Дальнейшее незначительное увеличение r переводит систему к устойчивым синфазным колебаниям; при этом противофазные колебания, инициируемые начальными условиями (+-), переходят после короткого процесса автомодуляции в синфазные колебания, либо затухают на низком уровне.

Далее, величины индуктивностей цепи связи были увеличены в четыре раза ($L=4080$ нГн), а величины емкостей – во столько же раз уменьшены (20 нФ), что, по предположению, не изменяет резонансную настройку цепи связи. Как следует из (6), граница неустойчивости синфазного режима по параметру r должна теперь находиться вблизи $r \approx 0,016$ Ом. Действительно, в аналогичной серии экспериментов при последовательном

увеличении сопротивлений r крайне «долгий» переход к устойчивому противофазному режиму (~ 60 мс) происходил при $r=0,019$ Ом. Фрагмент переходного процесса для данного случая показан на рис.8. Таким образом, проведенный численный эксперимент дает подтверждение полученному ранее из обобщенной модели аналитическому критерию разрушения синфазного режима.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе рассмотрена система двух автогенераторов, связанных друг с другом и с общей нагрузкой непосредственно через последовательные резонансные контуры. Проведен анализ частотных характеристик параметра взаимной связи и получен аналитический критерий неустойчивости синфазных колебаний. Методом численного моделирования изучен характер динамических процессов развития неустойчивостей синхронных режимов; показано, что при резонансной настройке связи могут быть реализованы условия устойчивости синфазных колебаний или условия их разрушения. Проведены оценки границ неустойчивости синхронных режимов и показано их соответствие аналитическому критерию разрушения синфазного режима. Полученные результаты могут быть полезны при построении систем с переключением когерентных режимов.

Список публикаций:

- [1] Новиков С. С., Усюкевич А. А. Неустойчивость синхронных режимов в системе двух связанных СВЧ-автогенераторов // Известия высших учебных заведений. Физика. 2012. Т. 55. № 11. С. 51 – 56.
- [2] Новиков С. С., Майдановский С.А. Симметричные и несимметричные системы сильно связанных автогенераторов // Радиотехника и электроника. 2003. Т. 48. № 5. С. 595 – 600.
- [3] Винтизенко И. И., Новиков С. С. Релятивистские магнетронные СВЧ-генераторы // Научно-исследовательский ин-т ядерной физики Томского политехнического ун-та ; Томский госуниверситет. - Томск : Издательство НТЛ, 2009.
- [4] Shigeji N., Jenshan L., Tatsuo I. Mode analysis and stabilization of a spatial power combining array with strongly coupled oscillators // IEEE transactions on microwave theory and techniques. – 1993.– V. 41. – No.10.– P. 1827 – 1837.
- [5] Владимиров С.Н., Майдановский А.С., Новиков С.С. Нелинейные колебания многочастотных автоколебательных систем // Томск: Изд. Том. Ун-та, 1993. – 203 с.
- [6] Новиков С. С., Усюкевич А. А. // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2012. Т. 20. №5. С. 16–30.
- [7] Новиков С.С., Усюкевич А. А. Явление разрушения когерентности в системе двух связанных СВЧ-автогенераторов // Известия высших учебных заведений. Физика. 2014. Т. 57, № 9/2. С.16-20.
- [8] Novikov S. S. Hyper-chaos mode in the mutual coupled and partial stable microwave oscillators system //Progress In Electromagnetics Research Symposium : proceedings. St. Peterburg, 2017. P. 1065-1069.
- [9] Новиков С. С. Бифуркационные переходы в системе двух СВЧ автогенераторов при резонансной взаимной связи Актуальные проблемы радиофизики АПР 2019: сборник трудов конференции. Томск, 2019. С. 200-205.
- [10] Новиков С. С., Усюкевич А. А. Динамические режимы системы двух связанных СВЧ автогенераторов // Крымская конференция "Микроволновые и телекоммуникационные технологии" Севастополь, Крым 2014. Т.1. С. 79 – 80.
- [11] Novikov S. S., Usjukevitch A. A. Coupling circuits for microwave self-oscillator systems with chaotic dynamics// Proc. 25-th Int. Crimean Conf. "Microwave & Telecommunication Technology", Sevastopol, Crimea, Russia, pp.525-526, 2015