

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ГЕЛИКОНОВОГО ВЕНТИЛЯ

Вунтесмери Ю. В., канд. техн. наук

*Национальный технический университет Украины "Киевский
политехнический институт". г. Киев, Украина*

HELICON ISOLATOR TRANSIENT STUDIES

*Youry V. Vountesmeriy, National technical university of Ukraine "Kiev Polytechnic Institute",
Kiev, Ukraine*

Введение

При проектировании мощных транзисторных генераторов с внешним возбуждением для радиопередающих устройств, разработчики стремятся максимально использовать возможности транзисторов по мощности. Вследствие этого транзисторы не имеют запасов по предельно допустимым параметрам и, даже при незначительных отклонениях от нормальных режимов эксплуатации, могут выйти из строя из-за рассогласования выходных каскадов передатчика с нагрузкой. Флюктуации импеданса нагрузки могут быть вызваны, например, климатическими изменениями окружающей среды, влиянием на параметры нагрузки расположенных рядом с ней объектов, механическими повреждениями, старением, разбросом параметров нагрузок различных типов при перестройке по частоте в рабочем диапазоне. Поэтому возникает актуальная научная и техническая проблема защиты выходных каскадов усилителей мощности передатчиков систем радиосвязи и радиовещания, работающих в метровом и декаметровом диапазонах волн, от произвольного изменения величины импеданса нагрузки.

В соответствии с паспортными данными на мощные высокочастотные транзисторы [1], двух - трехкратное превышение максимального допустимого значения коллекторного тока в них разрешается в течении не более 10...20 мкс. Известны устройства для защиты полосовых усилителей мощности, содержащие цепь связи, в состав которой входит направленный ответвитель, детектор и блок управления коэффициентом усиления усилителя мощности, либо реле отключения питания усилителя [2]. Недостатком таких устройств является большая постоянная времени цепи обратной связи, намного превышающая 20 мкс, вследствие чего эти устройства не в состоянии защитить полосовой усилитель мощности от одномоментного короткого замыкания нагрузки или ее обрыва. В [3] предложена схема защиты путем ограничения мощности полосового усилителя еще до вступления в работу цепи обратной связи при обрыве или коротком замыкании антенны, но никаких временных характеристик цепи обратной связи не приведено. В [4,5] рассмотрена возможность применения

полупроводниковых (геликоновых) вентилях для защиты передатчиков метрового и дециметрового диапазонов волн при изменении нагрузки и одновременно для уменьшения уровня интермодуляционных искажений. Геликоновые вентили являются аналогами ферритовых вентилях, которые широко используются в миллиметровом, сантиметровом, дециметровом и частично в метровом диапазонах волн. Вентиль, включенный между передатчиком и антенной, имеет минимальные потери в прямом направлении и максимальное затухание в обратном. Для надежной защиты передатчика, вся мощность отраженная от антенны должна рассеиваться в вентиле и не влиять на режим работы передатчика. Генератор с идеальным вентилем на его выходе является идеальным источником мощности: мощность падающей (прямой) волны не зависит от нагрузки.

Целью настоящей работы является исследование переходных режимов работы геликонового вентиля, возникающих при обрыве или коротком замыкании антенны.

Постановка задачи

Геликоновый вентиль представляет собой геликоновый резонатор с двумя ортогонально намотанными на него катушками индуктивности, помещенный в зазор магнитной системы, в котором создается сильное постоянное магнитное поле. Конструкция вентиля представлена на рис. 1.

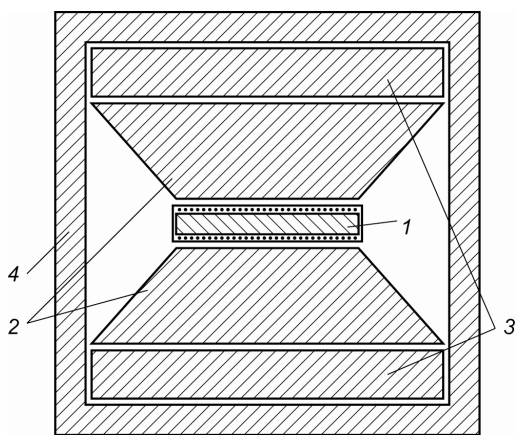


Рис. 1. Конструкция геликонового вентиля.
1 – геликоновый резонатор с катушками связи, 2 – полюсные наконечники, 3 – постоянные магниты, 4 – корпус вентиля.

Геликоновый резонатор представляет собой квадратную пластину полупроводника с соотношением толщины и поперечных размеров порядка 1:10. Для изготовления резонаторов используют узкозонные сильно легированные полупроводники n-типа с высокой подвижностью носителей. В настоящее время это, как правило, антимонид индия (n-InSb) легированный теллуром. Мощность электромагнитной волны, рассеиваемой в геликоновом резонаторе, зависит от его геометрических размеров и условий

теплоотвода к радиатору. В работе [6] исследовались характеристики вентиля в диапазоне температур. Показано, что при работе в диапазоне температур $\pm 50^{\circ}\text{C}$ необходимо выбирать в качестве полупроводниковой пластины электронный антимонид индия с концентрацией донорной примеси примерно $2 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$. Такая концентрация донорной примеси обеспечивает сохранение характеристик вентиля в диапазоне температур при малом уровне рассеиваемой мощности.

Максимальная мощность, рассеиваемая в геликоновом вентиле, определяется максимально допустимой температурой полупроводниковой пластины. Для повышения максимальной мощности необходимо обеспечить эффективный теплоотвод от полупроводника. В работе [7] рассмотрен стационарный режим теплопереноса внутри геликонового вентиля. Предложена одномерная модель, позволяющая оценивать распределение температуры в геликоновом вентиле в зависимости от величины мощности подаваемой на входы вентиля. Показано, что в стационарном режиме при прямом включении вентиль сохраняет свои характеристики в допустимых пределах при существенно большей мощности, чем при обратном включении. Таким образом, величина поверхности полупроводниковой пластины и, как следствие, габариты и масса всего вентиля зависят от мощности, рассеиваемой в вентиле при обратном включении в стационарном режиме.

В настоящей работе проведено исследование переходных характеристик геликонового вентиля при скачкообразном изменении нагрузки с целью уменьшения его массо-габаритных показателей при заданной мощности передатчика. Для решения поставленной задачи найдем зависимость температуры геликонового резонатора от времени при подаче на выход вентиля скачкообразно всей мощности передатчика, что соответствует, например, обрыву антенны.

Теоретическое исследование

В работе [7] представлены расчетная и экспериментальная зависимости разности температур геликонового резонатора и радиатора от величины рассеиваемой мощности в установившемся режиме для конкретного вентиля. В общем случае, разность температур в переходном режиме зависит от времени по формуле

$$\Delta T(t) = (T_u - T_0)(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}), \quad (1)$$

где T_u - температура геликонового резонатора в установившемся режиме, T_0 - температура геликонового резонатора в начальный момент времени в отсутствие рассеиваемой мощности, τ - тепловая постоянная времени.

В приближении одномерной модели, тепловая постоянная времени определяется уравнением

$$\tau = \frac{mc}{S} R, \quad (2)$$

где m - масса геликонового резонатора, c - удельная теплоемкость материала геликонового резонатора, S - приведённая поверхность теплопередачи, R - термическое сопротивление структуры геликонового вентиля.

Для многослойной одномерной модели структуры геликонового вентиля с n слоями

$$R = \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{\lambda_i}, \quad (3)$$

где h_i - толщина слоя, λ_i - коэффициент теплопроводности слоя. В данной модели принимается, что теплопередающие контакты между слоями идеальны и последний слой соединен с радиатором настолько массивным и теплопроводным, что его температура принимается постоянной и равной T_0 .

Приведенная поверхность теплопередачи геликонового резонатора представляющего собой квадратную пластину со стороной a и толщиной $2d$

$$S = 2a^2 + 8ad. \quad (4)$$

Нагревание геликонового резонатора, к которому в начальный момент времени подводится мощность P , при постоянной температуре окружающей среды T_0 описывается дифференциальным уравнением

$$\tau \frac{d(T - T_0)}{dt} + (T - T_0) = \frac{P}{S} R. \quad (5)$$

Изменение во времени температуры геликонового резонатора определяется уравнением

$$T(t) = T_0 + \frac{P}{S} R (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}). \quad (6)$$

Проведем расчет переходного процесса для геликонового вентиля с резонатором размерами $10 \times 10 \times 1.3 \text{ мм}^3$ из антимонида индия, легированного теллуром, с концентрацией донорной примеси $2.1 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$. Для модели теплопереноса выделены слои с характеристиками приведенными в таблице 1.

На рис. 2 представлены расчетные изменения во времени температуры геликонового резонатора при различных уровнях мощности, подаваемой на вентиль при обратном включении. Расчет производился для $T_0 = 20^\circ\text{C}$. Для данной конструкции вентиля и выбранном материале полупроводника, вентиль обеспечивает обратное затухание не менее 15 дБ при температуре геликонового резонатора не более 60°C [8].

Таблица 1. |
Материалы слоев конструкции геликонового вентиля в направлении от центра резонатора наружу.

№	Материал	Толщина, мм	Теплопроводность Вт/мК
0	n-InSb	0.65	14
1	Паста КПТ-8	0.05	0.85
2	Медный провод	0.2	380
3	Паста КПТ-8	0.05	0.85
4	Медный провод	0.2	380
5	Паста КПТ-8	0.1	0.85
6	Сталь	10	52
7	Магнит	5	12
8	Сталь	5	52

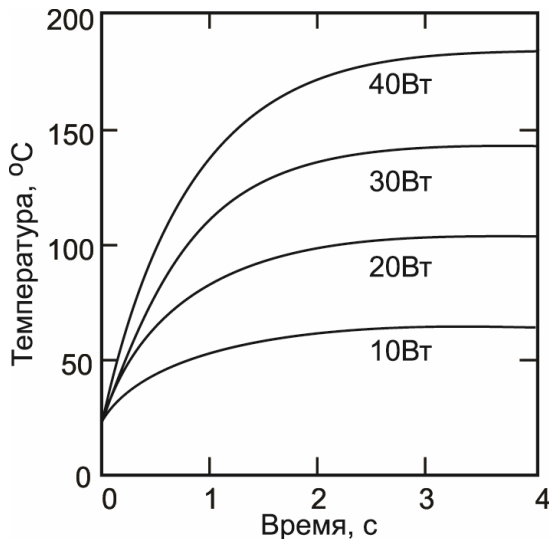


Рис.2. Расчетная зависимость температуры геликонового резонатора от времени после скачкообразного рассогласования нагрузки при различных мощностях передатчика.

Как видно из рис.2, этой температуры геликоновый резонатор достигает в стационарном режиме при мощности передатчика порядка 10 Вт. Время достижения в переходном режиме предельной температуры 60 °С для мощности передатчика более 10 Вт более 0,1 секунды, что намного превышает время срабатывания самого простого устройства отключения питания полосового усилителя мощности радиопередатчика.

Повышение предельной температуры геликонового резонатора возможно при увеличении концентрации донорной примеси в полупроводнике [8], что приводит к некоторому увеличению потерь в геликоновом вентиле при прямом включении.

Эксперимент

Экспериментальные исследования переходного режима работы геликонового вентиля проводилось на макете вентиля с геликоновым резонатором с указанными выше параметрами. Схема измерительного стенда представлена на рис.3.

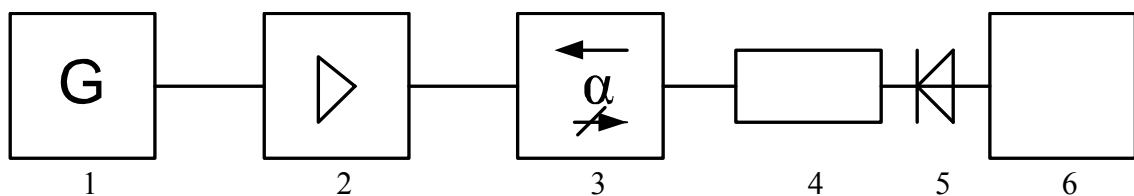


Рис.3. Стенд для исследования переходного режима работы геликонового вентиля.

На выход вентиля 3 в обратном включении в момент времени $t=0$ включался передатчик 1 с усилителем 2 мощностью 20 Вт. Мощность на входе вентиля ослаблялась аттенюатором 4 и фиксировалась безинерционной детекторной камерой 5, предварительно калиброванной вместе с аттенюатором измерителем мощности в стационарном режиме. Сигнал с детекторной камеры подавался на запоминающее регистрирующее устройство 6 с последующим пересчетом в мощность. На рис. 4 приведен график зависимости мощности на входе вентиля от времени. На рис. 5 показана зависимость обратного затухания геликонового вентиля от времени. Как видно из графика рис.5, обратное затухание вентиля ухудшается от -23дБ до -20дБ за время 0,6 секунды, и

до -15дБ за время 1,1 секунды, что с большим запасом обеспечивает защиту транзисторного усилителя мощности передатчика при нештатном режиме работы до момента отключения источника питания усилителя мощности.

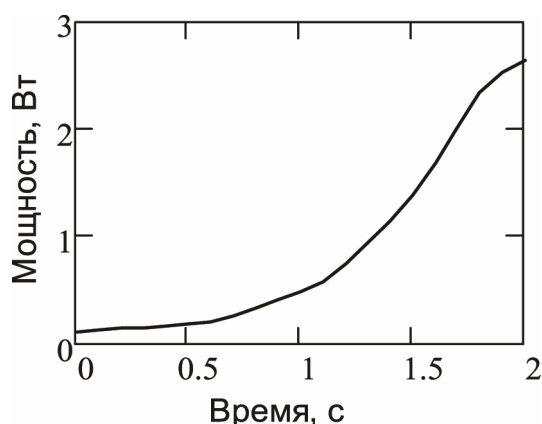


Рис.4. Зависимости мощности на входе геликонового вентиля от времени после скачкообразного рассогласования нагрузки.

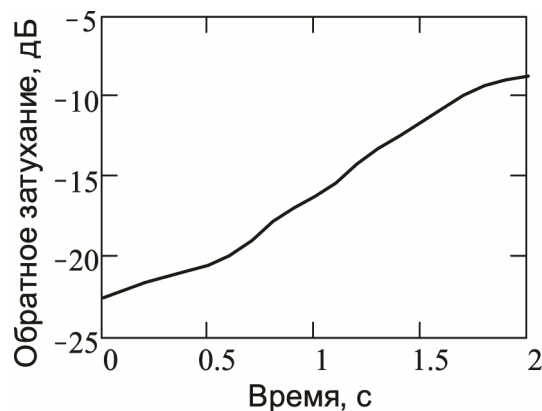


Рис.5. Зависимость обратного затухания геликонового вентиля от времени после скачкообразного рассогласования нагрузки.

В стационарном режиме мощность на входе достигает 3 Вт, что соответствует обратному затуханию - 8,24 дБ. Проведенные эксперименты показывают хорошее соответствие с теоретическими расчетами.

Заключение

Геликоновые вентили являются эффективным средством защиты транзисторных передатчиков при изменении нагрузки в метровом и дециметровом диапазонах волн. При обрыве или коротком замыкании нагрузки мощность отраженной волны поглощается в вентиле, тепловая постоянная времени которого с большим запасом достаточна для срабатывания самого простого устройства отключения питания полосового усилителя мощности радиопередатчика для защиты от перегрузки. Площадь поверхности геликонового вентиля можно рассчитывать по предельной мощности при прямом а не при обратном включении вентиля, что значительно уменьшает массо-габаритные показатели вентиля.

Литература

1. Петухов В.М. Транзисторы и их зарубежные аналоги: Справочник. В 4 томах./ В.М.Петухов. – М.: Издательское предприятие «РадиоСофт», – 2000 – 688 с.
2. Титов А.А. Схемотехника сверхширокополосных и полосовых усилителей мощности / А.А.Титов, В.Н.Ильющенко. – М.: Радиотехника, 2007. – 197 с.
3. Титов А.А. Устройство для защиты усилителя мощности от перегрузки / А.А.Титов, В.Н.Ильющенко. – Патент на изобретение № 2217861 Российского агентства по патентам и товарным знакам. – Оpubл. 27.11.2003 Бюл. № 33.

4. Вунтесмери В.С. Полупроводниковые вентили для радиопередатчиков КВ и УКВ диапазонов/ В.С.Вунтесмери, Ю.В.Завражнов, Г.П.Красилич, Мещеряков Е.Е. //Теория и техника радиосвязи. –Киев, 1993 –вып.1 – С.132–139.
5. Laurinavičius L., Protection of HF Transmitters from Reflection Failure by Help of Semiconductor Isolators/ L. Laurinavičius// Measurement science review. – 2009. – Volume 9. – № 3. – Page(s): 81-85.
6. Vountesmary V.S., Vountesmary Y.V. Temperature Characteristics of Broadband Helicon Isolators for Meter and Decameter Waves/ V.S.Vountesmary, Y.V.Vountesmary // Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on. – Oct. 2007. – Volume 55. – Issue 10. – Page(s): 2097 – 2102.
7. Вунтесмери Ю.В. Модель теплопереноса в геликоновом вентилю/Ю.В.Вунтесмери // Электроника и связь, тематический выпуск Электроника и нанотехнологии, – 2011 – №3 – С. 24 – 27.
8. Вунтесмери Ю.В. Оптимизация выбора материала для геликонового резонатора / Ю.В.Вунтесмери // Электроника и связь. –1998. – №4. –Ч.2 – С.374–378.

References

1. Petukhov V.M. Tranzistory i ikh zarubezhnye analogi: Spravochnik v 4-kh tomakh. /V.M.Petukhov. – М.: Izdatelskoe predpriatie "RadioSoft". – 2000. – 688s.
2. Titov A.A. Skhemotekhnika sverkhshirokopolosnykh i polosovykh usilitelei moshchnosti / A.A.Titov, V.N.Iliushenko. – М.: Radiotekhnika – 2007. – 197s.
3. Titov A.A. Ustroistvo dlia zashchity usilitelia moshchnosti ot peregruzki / A.A.Titov, V.N.Iliushenko. Patent na izobretenie № 2217861 Rossiiskogo agenstva po patentam i tovarnym znakam. – Opubl. 27.11.2003 Biul. № 33.
4. Vountesmary V.S. Poluprovodnikovyye ventili dlia radioperedatchikov KV i UKV diapazonov/ V.S.Vountesmary, Yu.V. Zavrazhnov, G.P. Krasilich, E.E. Meshcheriakov // Teoriia i tehnika radiosvazi. – 1993. – Vol.1 – S.132–139.
5. Laurinavičius L., Protection of HF Transmitters from Reflection Failure by Help of Semiconductor Isolators/ L. Laurinavičius// Measurement science review. – 2009. – Vol. 9. – №3. – Page(s): 81-85.
6. Vountesmary V.S., Vountesmary Y.V. Temperature Characteristics of Broadband Helicon Isolators for Meter and Decameter Waves/ V.S.Vountesmary, Y.V.Vountesmary // Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on. – Oct. 2007. – Volume 55. – Issue 10. – Page(s): 2097 – 2102.
7. Vountesmary Y.V Model teploperenosa v gelikonovom ventile/Y.V.Vountesmary // Elektronika i sviaz, tematicheskii vipusk Elektronika i nanotechnologii. – 2011. – №3. – S.24–27.
8. Vountesmary Y.V. Optimizatsiia vibora materiala dlia gelikonovogo rezonatora/ Y.V.Vountesmary // Elektronika i sviaz. – 1998. – №4. –Vol.2 – S.374–378.

Вунтесмері Ю.В. Дослідження перехідних режимів роботи геліконового вентиля. У роботі проведено теоретичне і експериментальне дослідження перехідних характеристик геліконового вентиля при зміні навантаження радіопередавача. Показано, що при обриві або короткому замиканні навантаження (антени) потужність відбитої хвилі поглинається в вентилю, теплова стала часу якого з великим запасом достатня для спрацювання найпростішого пристрою відмикання живлення підсилювача потужності радіопередавача для захисту від перенавантаження.

Ключові слова: захист радіопередавача, геліконовий вентилю, геліконовий резонатор, перехідний режим, теплова стала часу.

Вунтесмері Ю.В. Исследование переходных режимов работы геликонового вентиля. В работе проведено теоретическое и экспериментальное исследование переходных характеристик геликонового вентиля при изменении нагрузки

радиопередатчика. Показано, что при обрыве или коротком замыкании нагрузки (антенны) мощность отраженной волны поглощается в вентиле, тепловая постоянная времени которого с большим запасом достаточна для срабатывания самого простого устройства отключения питания усилителя мощности радиопередатчика для его защиты от перегрузки.

Ключевые слова: защита радиопередатчика, геликоновый вентиль, геликоновый резонатор, переходной режим, тепловая постоянная времени.

Y.V.Vountesmery Helicon isolator transient studies.

Introduction. Design of modern powerful transistor generators with external excitation in meter and decimeter wave ranges requires maximum utilisation of the transistor power capabilities. Transistors has no margins on the maximum permissible parameters and even minor derivations from normal mode can cause it fail. Known protection devices for band power amplifiers have a time constant greater than 20-30us permissible overhead of transistor and can not protect the amplifier from short-circuit load or its failure. Helicon isolator at the output of transmitters for meter and decimeter waves protects the transistor from the load mismatch and also decreases the intermodulation distortions level. The goal of this work is to study the on-turn transient of helicon isolator during the antenna break or short-circuit.

Formulation of the problem. The maximum power dissipation in the helicon isolator depends on the maximum allowable temperature of the semiconductor resonator plate. In this work the transient processes in the helicon isolator after the sudden load mismatch are studied in order to reduce its sizes and weight for the given power level.

Simulation. Temperature changes of the main part of helicon isolator – helicon resonator with sizes $10 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$ of indium antimonide doped with tellurium with concentration $2.1 \cdot 10^{23} \text{ m}^{-3}$ are simulated in the approximation of one-dimensional model. The thermal time constant was calculated. The resonator temperature variation are calculated with the different backward power levels. It is shown, that the time to reach the critical temperature 60°C for the isolator with 10W dissipation power level is more than 0.1s and much more then required timeout for even simple emergency shutdown system of the band power amplifier for transmitters.

Experimental results. Experimental study of the helicon isolator transient shows that the reverse attenuation decreases from -23dB to -20db in 0.6s and to -15dB in 1.1s. This timeout is enough to protect the transistor amplifier of the transmitter in emergency mode up to the power supply shutdown.

Conclusion. Helicon isolators are an efficient protection of transistor transmitters from load mismatch in meter and decimeter wave ranges. At antenna break or short-circuit the reflected power are adsorbed in the isolator. The thermal time constant of the isolator is enough for even the very simple emergency power shutdown system to switch.

Keywords: transmitter protection, helicon isolator, helicon resonator, thermal time constant.