

Нечаев В.Г.¹, Загородний А.С.², Добриков А.И.²
¹Томский государственный университет систем управления

и радиозлектроники

²АО «НПФ «Микран»

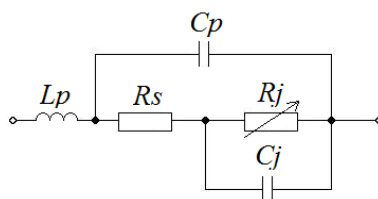
Температурная коррекция широкополосных детекторов мощности на основе низкобарьерных диодов

Статья посвящена исследованию температурной зависимости сверхвысокочастотных преобразователей мощности. Приведены аналитические выражения параметров диодов, зависящих от температуры. В работе представлено сравнение двух способов температурной коррекции: на основе добавления схемы делителя напряжения с включением диода, и на основе применения термисторного датчика температуры. Представлены результаты экспериментальных исследований детекторов на основе низкобарьерных диодов ZB-28.

Ключевые слова: Преобразователь мощности, детекторный диод, терморезистор, аппроксимация, температурная коррекция, корректирующая функция, алгоритм коррекции.

Для измерения мощности сигналов СВЧ широко применяются преобразователи, реализуемые с использованием диодных детекторов. По сравнению с калориметрическими, термисторными и другими методами, диодные детекторы обладают рядом преимуществ: способность обеспечивать большой диапазон рабочих частот, малое время реакции, возможность обеспечения высокого уровня чувствительности [1]. Они активно используются в измерительных приборах различных мировых производителей. Известны работы [2-4], представляющие устройства детектирования на основе диодов, работающих в диапазоне частот свыше 110 ГГц. Подобные публикации свидетельствуют о перспективности разработок устройств детектирования диапазона СВЧ и КВЧ на основе низкобарьерных диодов. Однако диодные детекторы имеют существенный недостаток – зависимость выходных показаний от температуры, обусловленной изменениями вольт-амперной характеристики (ВАХ) диодов [5].

В работе в качестве исследуемых применялись детекторные диоды ZB-28 [2], с граничной частотой свыше 100 ГГц (емкость перехода 35 фФ), тангенциальной чувствительностью 1 нВт (минус 60 дБм). Эквивалентная схема детекторного диода представлена на рис. 1.



R_s – объемное омическое сопротивление базы, R_j – сопротивление перехода, C_j – ёмкость перехода, C_p , L_p – паразитные ёмкость и индуктивность

Рис. 1. Эквивалентная схема диода.

Наибольшему влиянию температуры в данной схеме, подвержено сопротивление перехода R_j . Выражение (1) описывает зависимость сопротивления перехода от изменения температуры диода [5]:

$$R_j = \frac{n \cdot k \cdot T}{q \cdot (I_b + I_s)}, \quad (1)$$

где n – коэффициент идеальности диода;
 k – постоянная Больцмана;
 T – температура;
 q – заряд электрона;
 I_s – ток насыщения диода;
 I_b – внешний ток смещения.

Ток насыщения диода, представленный в выражении (1), характеризует эмиссионную способность катода, которая также зависит от температуры. Математически данная зависимость может быть представлена выражением [6,7]:

$$I_s = I_{s0} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{2/n} \cdot e^{-\frac{q \cdot \psi}{k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}, \quad (2)$$

где I_{s0} – ток насыщения диода при комнатной температуре;
 ψ – ширина запрещенной зоны полупроводника;
 T_0 – комнатная температура в Кельвинах.

Сочетание этих двух уравнений выражает соотношение для сопротивления перехода в зависимости от изменения температуры. Используя в представленных формулах типичные значения SPICE-параметров детекторных диодов ZB-28 [8, 9] ($I_{s0} = 11 \mu\text{кА}$, $n = 1,13$, $\psi = 1,42 \text{ эВ}$), зависимость сопротивления перехода приобретает вид графика, представленного на рисунке 2.

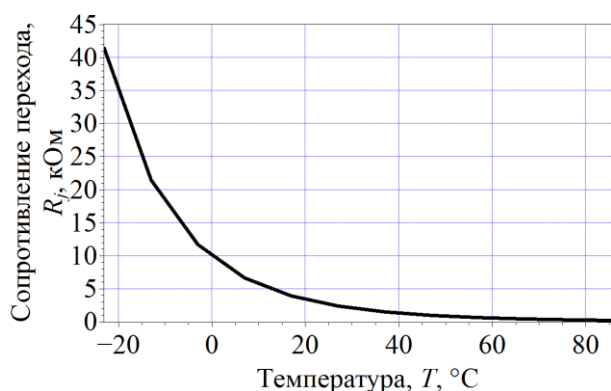


Рис. 2. Зависимость сопротивления перехода от температуры.

Как видно из рисунка, при температурах ниже комнатной, изменение сопротивления перехода велико, что приводит к существенному отклонению выходного напряжения детектора. Выражение (3) показывает, какое влияние осуществляет зависимость изменения сопротивления перехода на выходное напряжение [5]:

$$V_{out} = V_{rec} \cdot \frac{R_l}{R_l + R_j}, \quad (3)$$

где V_{rec} – выпрямленное напряжение;

R_l – нагрузочное сопротивление детектора.

Представленные выражения свидетельствуют об отклонении зависимости падения напряжения на диоде за счет изменения его температуры и тока насыщения. Проведя серию экспериментов с использованием детекторов на основе диодов ZB-28 [10, 11], были получены зависимости выходного напряжения от входного уровня мощности при разных температурах, представленные на рисунке 3а. Для более общего определения температурного влияния на показания детектора, в узком температурном диапазоне были проведены измерения выходного напряжения диода на разных частотах при фиксированной мощности электрического сигнала (рис. 3б).

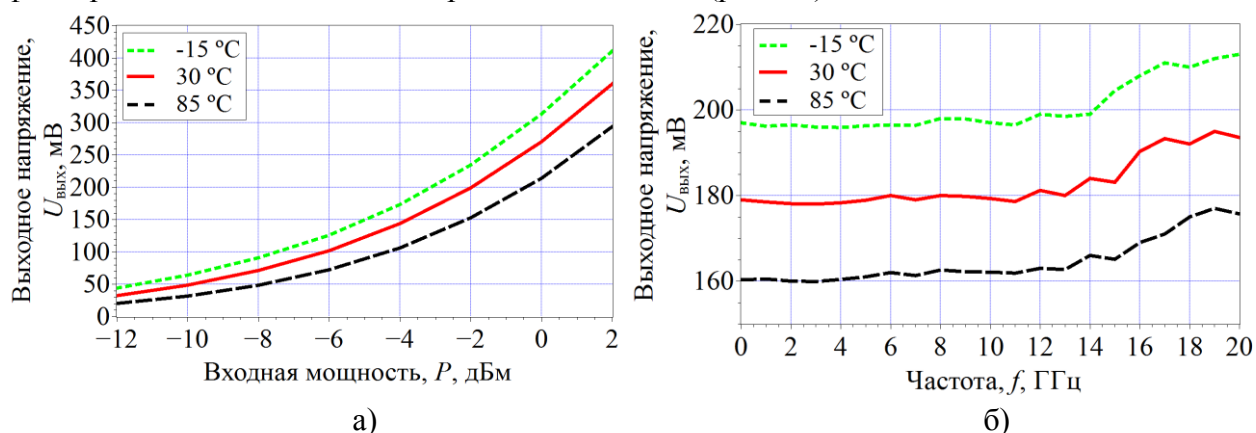


Рис. 3. Детекторная (а) и частотная (б) характеристики диодного детектора при разных значениях температуры.

Видно, что существенных изменений в исследуемом частотном диапазоне не наблюдается и в целом зависимость не изменяет свою характерную форму при разных значениях температуры.

Способы компенсации влияния температуры

Для уменьшения температурного влияния на диодные детекторы, возможна реализация следующих методов: термостатирование, включение опорных диодов в цепь детектора, использование показаний термодатчиков на основе терморезисторов, работающих совместно с арифметико-логическим устройством (далее АЛУ).

Реализация метода термостатирования заключается в поглощении или выделении тепла в необходимой области устройства, для обеспечения некоторой рабочей температуры, тем самым, исключая температурный уход показаний [13]. Однако следует учесть, что применение данного метода проблематично для портативных преобразователей мощности и потребует дополнительных энергозатрат на разогрев детекторной камеры, а также увеличения габаритов устройства. Использование метода термостатирования более целесообразно для стационарных приборов, в которых имеет место использование выносных измерительных сенсоров, в статье данный подход подробно не рассматривается.

Схема амплитудного детектора, представленная на рисунке 4а, содержит детектирующий диод VD1 и фильтр нижних частот на основе C1 и R1. Метод включения опорных диодов, представленный на рисунке 4б, осуществляется за счет подключения в схему делителя напряжения, в цепь которого включен диод VD2, идентичный VD1. При

изменении температуры у обоих диодов аналогичным образом изменяется сопротивление перехода, за счёт чего компенсируется изменение выходного напряжения [13].

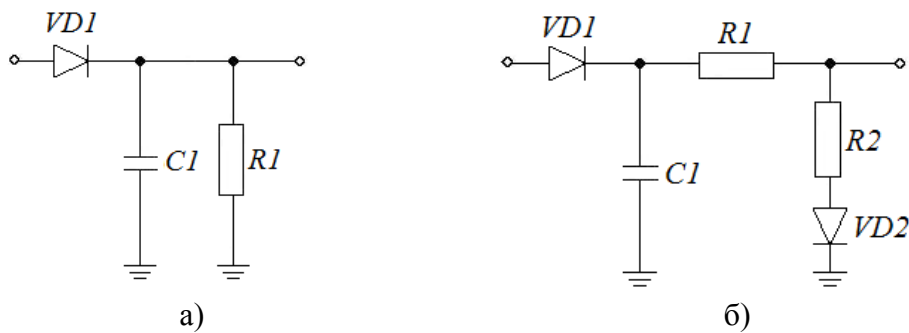


Рис. 4. Диодный детектор без схемы температурной компенсации (а) и с ней (б)

На рисунке 5 изображены экспериментально полученные зависимости выходного напряжения от мощности для схем на рисунках 4а и 4б. Благодаря применению делителя напряжения с диодом удалось уменьшить изменение напряжения в 2-3 раза. Представленный способ достаточно хорошо осуществляет температурную компенсацию, когда речь идет об измерениях в узком динамическом диапазоне. Однако, для задачи обеспечения широкого динамического диапазона, данный метод теряет свою значимость, из-за уменьшения выходного напряжения, вызванного делителем (см. рис. 5).

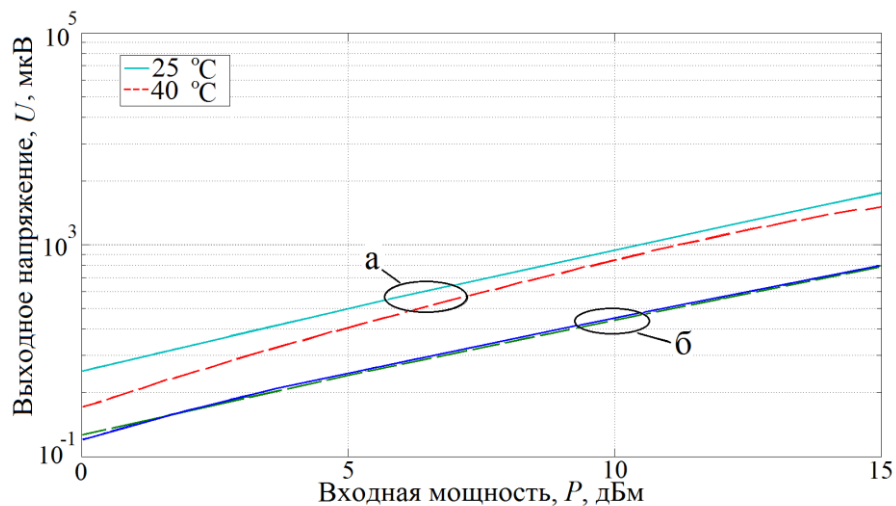
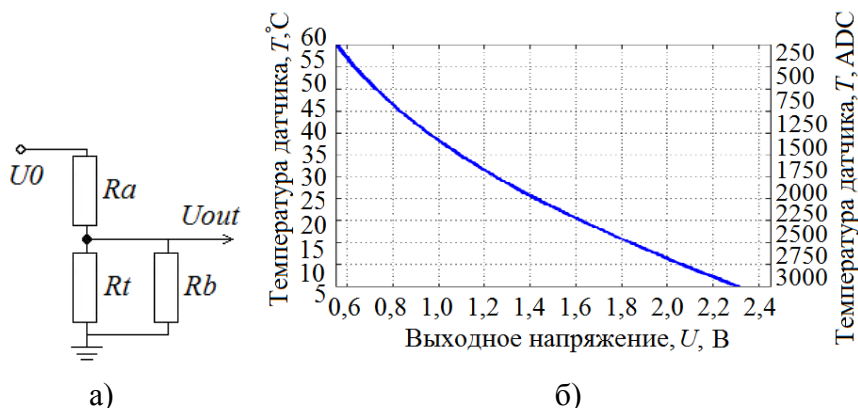


Рис. 5. Детекторные характеристики диодного детектора без делителя с опорным диодом (а) и с ним (б)

Метод на основе использования показаний термодатчика, работающего в связке с АЛУ, исключает все недостатки, имеющие место в методах термокоррекции, описанных выше. В АЛУ формируются поправочные коэффициенты, позволяющие произвести температурную коррекцию результатов измерений в широком диапазоне мощностей.

Температурная коррекция с использованием термодатчика

Для выбора цепи термокоррекции был применен вариант схемы подключения термистора и делителя напряжения, представленный на рисунке 6а [14]. В качестве термочувствительного элемента был использован терморезистор серии NCP18XH103с отрицательным температурным коэффициентом [15]. На рисунке 6б изображен график зависимости выходного напряжения термодатчика от изменения температуры.



R_a, R_b – резисторы выполняющие роль делителя напряжения (24 кОм и 240 кОм); R_t – термистор (10 кОм)
 Рис. 6. Схема подключения (а) и работа термодатчика (б)

Предложенный датчик обладает малыми габаритами, что позволило установить его внутри СВЧ-блока в непосредственной близости с диодами. А высокое быстродействие и достаточная чувствительность позволят минимизировать время отклика системы термокоррекции на изменения температуры.

Алгоритм коррекции

На основе проведенных температурных испытаний СВЧ измерителей мощности с использованием термодатчика в СВЧ-блоке (детекторной камере), был реализован следующий алгоритм термокоррекции.

1. Этап калибровки. Измеритель мощности прогревается до температуры +30 °С, после чего фиксируются показания термодатчика, установленного в СВЧ-блок. Выходные показания при данной температуре считаются опорными, относительно которых и будет проводиться коррекция выходного напряжения детектора.

2. Для построения корректирующей функции необходимо определить выходные детектируемые напряжения прибора в температурном диапазоне от +5 °С до +50 °С. Измерения произведены с температурным шагом около 5 °С.

3. Выполняется нормировка показаний, путем математического деления всех значений детекторных характеристик на эталонные. Полученные характеристики аппроксимируются полиномом второй степени по формуле 4. Графическое отображение результатов аппроксимации приведено на рисунке 7.

$$K_T = a \cdot T^2 + b \cdot T + c, \tag{4}$$

где a, b, c – коэффициенты корректирующей функции, которые требуется записать в память АЛУ.

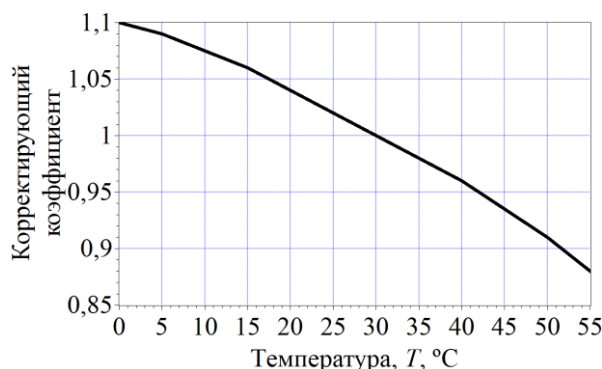


Рис. 7. Корректирующая функция

4. Коррекция показаний производится за счет деления измеренного значения напряжения, которое является пропорциональным уровню мощности входного СВЧ сигнала, на корректирующий коэффициент $K_{кор}$ (выражение 5), который является результатом расчета полинома (выражение 4) для данного значения температуры T .

$$U = \frac{U_0}{K_T}, \quad (5)$$

где U_0 – показание измерителя мощности;

K_T – корректирующий коэффициент.

Проверка работы температурной коррекции

На рисунке 8 представлены результаты температурной коррекции по предлагаемому алгоритму.

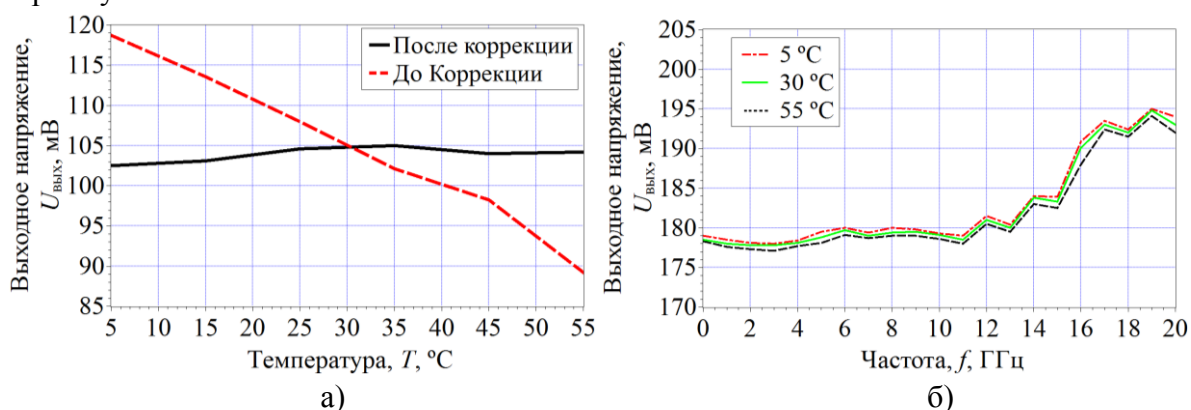


Рис. 8. Зависимость детектируемого напряжения от температуры (а) и частотные характеристики с учетом коррекции (б)

Полученные результаты позволяют установить, что удалось уменьшить изменения показаний детектора с $\pm 15\%$ без коррекции до $\pm 1.5\%$ с коррекцией.

Предложенный метод температурной коррекции широкополосных детекторов мощности с использованием показаний термодатчиков, может успешно применяться в измерительном СВЧ оборудовании.

Заключение

Оба представленных способа компенсации температурных изменений обеспечивают коррекцию, достаточную для широкого круга радиотехнических задач. Включение опорных диодов в цепи делителя снижает чувствительность детектора, однако не требует применения АЛУ и может использоваться для детекторов в составе различных оборудования. Коррекция с применением термисторного датчика не ухудшает параметров детектора и в большей степени подходит для измерительного оборудования.

Библиографический список

1. Билько М.И., Томашевский А.К., Шаров П.П. Измерение мощности на СВЧ // М.: Советское радио. – 1976. – С. 14.
2. Hrobak, M. et al. Planar zero bias Schottky diode detector operating in the E-and W-band / M. Hrobak // Microwave Conference (EuMC). – IEEE, 2013. – P. 179-182.
3. Xie, L. et al. A W-band detector with high tangential signal sensitivity and voltage sensitivity / L. Xie // Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), 2010 International Conference on. – IEEE, 2010. – P.528-531.
4. Xu, K. et al. A broad W-band detector utilizing zero-bias direct detection circuitry / K. Xu // Computational Problem-Solving (ICCP), 2011 International Conference on. – IEEE, 2011. – P. 190-194.

5. Eriksson H., Raymond W. A temperature compensated linear diode detector // Wireless Semiconductor Division Agilent Technologies Newark, California. – P. 1-5.
6. The Zero Bias Schottky Diode Detector at Temperature Extremes – Problems and Solutions, Application Note 1090. – Agilent Technologies, Inc. – 1999. – P. 1-3.
7. Diode Detector Simulation using Agilent Technologies EEsof ADS Software, Application Note 1156 // Agilent Technologies, Inc. – 1999.
8. Zero Bias Diode ZB-28, Preliminary Datasheet. – MICRAN, Rev. 2015-09-04 / Specifications subject to change without notice. – 2015. – P. 1-2.
9. Юнусов И.В., Ющенко А.Ю., Плотникова А.М., Арыков В.С., Загородний А.С. Сверхвысокочастотные низкобарьерные детекторные диоды на основе р-п-перехода // Физика. №9-2. – 2012.
10. Загородний А.С., Черепанов А.В. Детекторы мощности сигналов СВЧ компании «Микран» // СВЧ-электроника. №1. – 2016. – С. 28-32.
11. Нечаев В.Г. Исследование детекторов сигналов СВЧ с двумя измерительными каскадами // Материалы 53-й международной научной студенческой конференции. – 2015. – С. 33.
12. Сайкин К.С. Системы термостатирования в радиоэлектронике. – Казань. – 1997. – С. 4-11.
13. Surface Mount RF Schottky Barrier Diodes. HSMS-282x (Data Sheet) // Avago Technologies, November 26, 2014. – P. 6-9.
14. Шашков А.Г. Терморезисторы и их применение // М.: Энергия. – 1967. – С. 320.
15. PTC-NTC for Surface Mounting Application – Murata Manufacturing Co. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.murata.com/en-eu/products/thermistor/ntc>, свободный (дата обращения: 02.02.2017).