

УДК 621.37

В.М. Малышев, Ю.А. Матвеев, А.Б. Никитин, А.В. Худяков

МОДЕЛЬ ВАРИКАПА ДЛЯ РАЗРАБОТКИ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ ПЕРЕСТРАИВАЕМЫХ ГЕНЕРАТОРОВ СВЧ

V.M. Malyshev, Yu.A. Matveev, A.B. Nikitin, A.V. Khudyakov

VARACTOR DIODE MODEL USED TO DESIGN WIDEBAND MICROWAVE VOLTAGE-CONTROLLED OSCILLATORS

Рассмотрены модели варикапов, предназначенных для сверхширокополосной перестройки частоты твердотельных генераторов сантиметрового диапазона длин волн. На основе экспериментальных данных уточнены параметры модели варикапа, адекватно отражающей его свойства и позволяющей осуществлять разработку перестраиваемых генераторов с помощью программ автоматизированного проектирования.

ВАРИКАП; СВЧ-ГЕНЕРАТОР; ПЕРЕСТРОЙКА ЧАСТОТЫ.

This article describes the nonlinear model of the varactor diode for use in broadband microwave voltage-controlled oscillator. The proposed model has been verified based on measurement data and adequately reflects the characteristics of the varactor diode. This varactor model can be used in various types of CAD for accurately design broadband microwave VCO and frequency-tuning circuits.

VARACTOR DIODE; MICROWAVE OSCILLATOR; FREQUENCY TUNING.

Генератор, управляемый напряжением (ГУН), – один из неотъемлемых компонентов современных синтезаторов частоты с ФАПЧ. Использование в качестве такого ГУН сверхширокополосных твердотельных СВЧ-генераторов с варикапами дает возможность создавать быстродействующие широкодиапазонные источники сигналов [1, 2].

Одним из ключевых элементов сверхширокополосных ГУН, с полосой перестройки, достигающей октавы и более, является варикап. Параметры варикапа в существенной степени определяют такие характеристики ГУН, как диапазон перестройки, нелинейность зависимости частоты генерации от управляющего напряжения, флуктуационные характеристики генератора и ряд других [2, 3]. Поэтому при

построении сверхширокополосных ГУН требуется наличие нелинейной модели варикапа, адекватно отражающей его свойства и позволяющей осуществлять процесс разработки генератора с помощью современных программ автоматизированного проектирования СВЧ-устройств. В данной статье рассматриваются модели варикапов, предназначенных для сверхширокополосной перестройки частоты твердотельных генераторов сантиметрового диапазона волн, выполненных по гибридной технологии.

Генераторы с октавной перестройкой частоты предъявляют повышенные требования к управляющим элементам – варикапам. Так, например, коэффициент перекрытия емкости диода $k = C_{\max}/C_{\min}$, необходимый для получения такой перестройки, должен быть не менее четырех, даже в случае идеа-

лизированного представления колебательной системы генератора одиночным колебательным контуром на сосредоточенных параметрах, вся емкость которого является управляемой. В реальности наличие паразитных параметров варикапа и компонентов схемы генератора, а также учет влияния реактивной составляющей сопротивления транзистора приводят к существенному повышению требуемых значений коэффициента перекрытия емкости k до величин порядка 6–8. Впрочем, конкретные требования к СВЧ-диодам, обеспечивающим октавную перестройку частоты, могут быть сформулированы на основе результатов анализа ГУН при наличии модели активного элемента генератора.

Выбор варикапов с такими неординарными характеристиками еще более сужается из-за необходимости обеспечения столь существенного изменения емкости в области значений менее 1 пФ, а в коротковолновой части сантиметрового диапазона и до минимальных величин менее 0,1 пФ.

К числу диодов с требуемыми параметрами можно отнести, например, варикапы BB857 (фирма Infineon [4]) с коэффициентом перекрытия емкости $k = 12$ и минимальным значением емкости $C_{\min} = 0,5$ пФ, варикапы серии MA46H07X (фирма MACOM [5]) с $k = 5,5, \dots, 7,5$ и минимальным значением емкости менее 0,4 пФ, варикапы серии MGV125 (фирма Aeroflex [6]) с коэффициентом перекрытия емкости $k = 10$, отличающиеся от других аналогичных приборов рекордно малыми значениями емкостей. Например, для диода MGV125-08 величина C_{\min} по данным производителя менее 0,06 пФ [6]. Кроме того, эти приборы MGV125 поставляются не только в корпусном исполнении, но и в форме чипа (модификация MGV125-XX-C01A), представляющем собой параллелепипед размером $0,3 \times 0,3 \times 0,12$ мм. Столь малые размеры снижают влияние паразитных параметров и делают удобным применение таких диодов в гибридно-интегральных микросхемах сантиметрового диапазона.

На рис. 1 представлен один из вариантов всеупотребительной эквивалентной схемы варикапа, которая может использо-

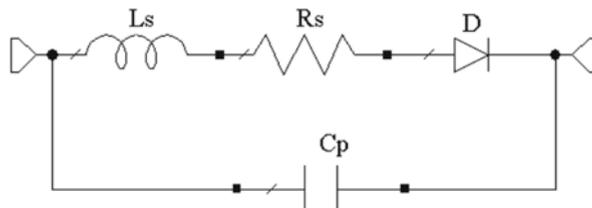


Рис. 1. Эквивалентная схема варикапа

ваться для моделирования ГУН [3].

Данная модель включает в себя в качестве подсхемы, обозначенной на рисунке символом диода D, SPICE-модель выпрямляющего перехода. Основные параметры SPICE-модели, определяющие характеристики варикапа, — барьерная емкость при нулевом смещении C_0 , контактная разность потенциалов U_j и степень нелинейности выпрямляющего перехода M , входящие в аппроксимацию вольт-фарадной характеристики диода $C(U)$ [3]:

$$C(U) = C_0 \cdot (1 - U/U_j)^{-M}.$$

Некоторые производители предоставляют данные, позволяющие построить модель, необходимую для проектирования ГУН. Например, приводят вольт-фарадные характеристики варикапов. Такой подход, базирующийся на имеющихся в технической документации на полупроводниковые приборы данных, был использован при разработке сверхширокополосных ГУН сантиметрового диапазона длин волн для построения моделей варикапов BB857, MA46H070, MA46H071 в полосе частот 2...12 ГГц и MGV125 в полосе частот 4...16 ГГц. На основе предоставляемых производителями вольт-фарадных характеристик диодов методами параметрической оптимизации были найдены значения параметров их моделей, обеспечивающие хорошее совпадение вольт-фарадных характеристик с данными производителя [4–6]. Однако результаты экспериментальных исследований макетов генераторов, разработанных на основе таких моделей, показали существенное отличие полученных характеристик генератора от рассчитанных. Дополнительные измерения S-параметров, используемых в перестраиваемых генераторах варикапов, показали, что причиной полученных расхождений

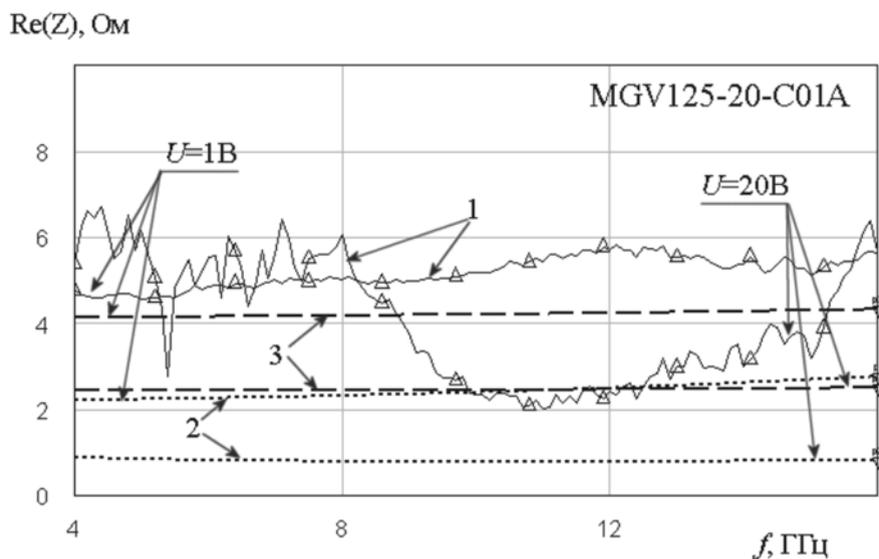


Рис. 2. Частотные зависимости вещественной составляющей сопротивления варикапа: 1 – эксперимент (Δ — Δ); 2 – модель на основе паспортных данных (.....); 3 – уточненная модель (— — —)

являются неточности моделей диодов, созданных на основе их паспортных данных. В качестве примера на рис. 2 приведены частотные зависимости вещественной, а на рис. 3 – мнимой составляющей сопротивления варикапов MG125-20-C01A для двух крайних значений напряжения смещения на диоде ($U = 1$ В и 20 В).

На графиках экспериментальные зависимости отмечены цифрой 1, а результаты

моделирования – 2. Как видно из графиков, отличие экспериментальных данных от характеристик моделей проявляются не только в изменении среднего значения емкости варикапа (рис. 3), но и в увеличении потерь (рис. 2), а также в уменьшении эквивалентного коэффициента перекрытия емкости k . Так, например, если вещественная составляющая сопротивления $Re(Z)$ модели диода MG125-20 изменяется в преде-

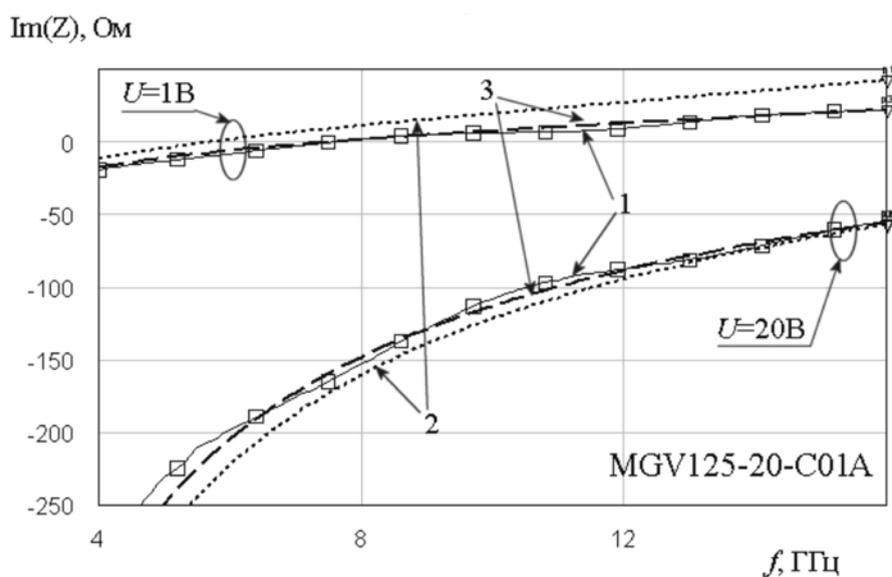


Рис. 3. Частотные зависимости мнимой составляющей сопротивления варикапа: 1 – эксперимент (\square — \square); 2 – модель на основе паспортных данных (.....); 3 – уточненная модель (— — —)

лах 1...2,5 Ом, то по данным измерений $2 \text{ Ом} < \text{Re}(Z) < 6 \text{ Ом}$ (см. рис. 2). Еще более существенно увеличение сопротивления для диодов других типов: MGV125-08 и MGV125-09. Так, для диода MGV125-09 наблюдается увеличение потерь в 3–5 и более раз.

Указанные обстоятельства обусловлены, очевидно, отличием условий измерений его характеристик, приведенных в паспортных данных, от требуемых, соответствующих реальным режимам работы варикапа при перестройке контура генератора. К таким наиболее важным отличиям следует отнести частотный диапазон и способ монтажа диода на плате генератора.

Первое обстоятельство может сказываться на неверном определении последовательного сопротивления R_s (см. рис. 1, 2). Как, например, отмечается в [3], нахождение R_s из приведенных в паспортных данных величин добротности диода может приводить к существенно заниженным значениям этого сопротивления. Учет в дополнение к частотному диапазону особенностей монтажа диода на плате генератора (например, влия-

ния контактных площадок микрополосковой схемы) может существенно влиять на общий вид эквивалентной схемы варикапа.

Данные измерений показали необходимость создания скорректированных моделей варикапов, требуемых для разработки перестраиваемых генераторов. Коррекция моделей варикапов потребовала не только подбора новых значений параметров, но и изменения структуры эквивалентной схемы. Упрощенный вариант модели диодов серии MGV125, обеспечивающий удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными, представлен на рис. 4.

На рис. 4 а) приведена эквивалентная схема чипа варикапа. На данной схеме символом диода D обозначена его нелинейная SPICE-модель. Для обеспечения надлежащего соответствия характеристик модели результатам измерений последовательное сопротивление R_s пришлось разделить на две составляющие: R_s и R. Для учета влияния на импедансные характеристики варикапа неоднородностей, возникающих при включении диода в микрополосковую линию, использовалась схема, приведенная

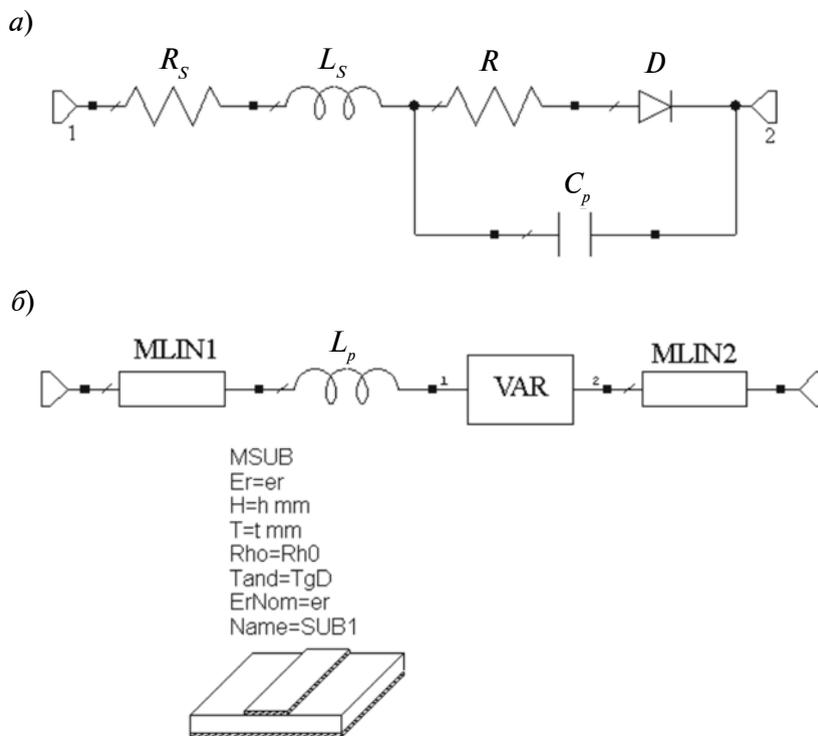


Рис. 4. Модель варикапа

Параметры диодов

Варикап	M	C_0 , пФ	U_J , В	L_S , нГн	R_S , Ом	R , Ом	C_p , пФ	l_1 , мм	l_2 , мм	L_p , нГн
MGV125_08	1,315	1,81	0,926	0,072	2,0-6,5	3,5	0,033	0,092	0,181	0,15
MGV125_09	1,355	2,2	1,016	0,07	1,8-6,0	3,0	0,035	0,084	0,155	0,18
MGV125_20	1,372	3,872	1,075	0,03	1,8-3,2	2,0	0,05	0,08	0,106	0,175
MGV125_21	1,315	6,0	0,877	0,075	1,0-1,8	1,5	0,08	0,084	0,155	0,173

на рис. 4 б. На этой схеме элементы MLIN1 и MLIN2 – это отрезки микрополосковых линий шириной $w = 0,5$ мм и длиной l_1 и l_2 , соответственно, которые моделируют контактные площадки, L_p – индуктивность проволочного контакта линии с анодом диода. Блоком VAR на рис. 4 б обозначена модель диодного чипа, представленная на рис. 4 а.

В таблице приведены параметры скорректированной нелинейной SPICE-модели диодов (C_0 , U_J и M) и значения элементов эквивалентных схем варикапов (рис. 4), вычисленные на основе экспериментальных данных.

Импедансные характеристики, полученные для скорректированных моделей варикапов, обозначены на рис. 2, 3 цифрой 3. Как видно из графиков, скорректированный вариант модели более адекватно описывает характеристики варикапов в исследуемом частотном диапазоне. Так, например, диапазон изменения вещественной составляющей сопротивления $Re(Z)$ для модели

MGV125-20-C01A составляет 2,4...4,2 Ом, а по результатам измерений 2...6 Ом. Для мнимой составляющей $Im(Z)$ максимальное отличие от экспериментальных данных снижается в несколько раз (рис. 3). Особенно это заметно для малых значений управляющего напряжения ($U = 1...3$ В), где несовпадение импедансных характеристик уменьшается с сотен до единиц процентов.

Таким образом, в результате проделанной работы уточнены модели варикапов, включенных в разрыв микрополосковой линии, которые могут использоваться при проектировании сверхширокополосных перестраиваемых генераторов СВЧ диапазона, построенных по гибридной технологии. Полученные модели прошли апробацию в процессе разработки микрополосковых ГУН с октавной полосой перестройки в сантиметровом диапазоне волн, выполненных на SiGe-транзисторе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Chenakin A.** Frequency synthesizers: Concept to Product. Artech House, Inc., 2011. 254 p.
2. **Горевой А.** Выбор генераторов для построения малозумящих СВЧ-синтезаторов // Компоненты и технологии. 2012. № 6. С. 87–92.
3. **Stauffer G.H.** Finding the Lumped Element Varactor Diode Model // High Frequency Electronics. 2003. Vol. 2. No. 6. Pp. 22–28.
4. Infineon BB837/BB857 Silicon Tuning Diode. Datasheet [электронный ресурс] /Infineon Tech-

- nologies AG // URL: <http://www.infineon.com>
5. MA46 Series. Surface Mount GaAs Tuning Varactors. Datasheet Rev. V6 [электронный ресурс] / M/A-COM Technology Solutions Inc. // URL: <http://www.macomtech.com/varactor-tuning-diodes>
6. GaAs Hyperabrupt Varactor Diodes MGV Series. Datasheet [электронный ресурс] / Aeroflex Microelectronic Solutions // URL: <http://www.aeroflex.com>

REFERENCES

1. **Chenakin A.** Frequency synthesizers: Concept to Product, Artech House, Inc., 2011, 254 p.
2. **Gorevoy A.** Vybor generatorov dlya postroyeniya malozhumyashchikh SVCH-sintezatorov [Choosing generators for constructing low-noise microwave syn-

- thesizers], *Komponenty i tekhnologii* [Components & Technologies], 2012, No. 6, Pp. 87–92. (rus)
3. **Stauffer G.H.** Finding the Lumped Element Varactor Diode Model, *High Frequency Electronics*, 2003, Vol. 2, No. 6, Pp. 22–28.

4. Infineon BB837/BB857 Silicon Tuning Diode. Datasheet. *Infineon Technologies AG*. Available: <http://www.infineon.com>

5. MA46 Series. Surface Mount GaAs Tuning Varactors. Datasheet Rev. V6. *M/A-COM Technology Solutions Inc.*

Available: <https://www.macomtech.com/varactor-tuning-diodes>

6. GaAs Hyperabrupt Varactor Diodes MGVS Series. Datasheet. *Aeroflex Microelectronic Solutions*. Available: <http://www.aeroflex.com>

МАЛЫШЕВ Виктор Михайлович – доцент кафедры радиотехники и телекоммуникаций Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат физико-математических наук.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

E-mail: uhmal@mail.ru

MALYSHEV, Victor M. *St. Petersburg State Polytechnical University.*

195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.

E-mail: uhmal@mail.ru

МАТВЕЕВ Юрий Александрович – руководитель отделения разработки РПУ, ООО «Специальный Технологический Центр».

195256, Россия, Санкт-Петербург, ул. Софьи Ковалевской, д. 22.

E-mail: matveev.rf@gmail.com

MATVEEV, Yuriy A. *Special Technological Center JSC.*

195256, Sofia Kovalevskaya Str. 22, St. Petersburg, Russia.

E-mail: matveev.rf@gmail.com

НИКИТИН Александр Борисович – доцент кафедры радиотехники и телекоммуникаций Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат технических наук.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

E-mail: nikitin@mail.spbstu.ru

NIKITIN, Aleksandr B. *St. Petersburg State Polytechnical University.*

195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.

E-mail: nikitin@mail.spbstu.ru

ХУДЯКОВ Артем Владимирович – студент кафедры радиотехники и телекоммуникаций Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

KHUDYAKOV, Artem V. *St. Petersburg State Polytechnical University.*

195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.