

УДК 621.373.122/.52

А.В. Горевой

## Генератор диапазона 1–2 ГГц с повышенной крутизной регулировочной характеристики

Исследована и подтверждена возможность построения генератора, управляемого напряжением (ГУН), диапазона 1–2 ГГц с повышенной крутизной частотной регулировочной характеристики. Уточнен набор системных требований к октавным генераторам. Рассмотрено несколько вариантов построения резонаторов такого ГУН. Изучены схемы генераторов ведущих мировых производителей, выбранных в качестве прототипов, и предложена своя схема. Уточнены требования к оптимальной вольт-фарадной характеристике варикапа и подобран конкретный варикап. Построенный в результате образец ГУН позволяет достигнуть октавного перекрытия частоты непосредственным изменением смещения варикапа от 0 до 5 В.

**Ключевые слова:** генератор, управляемый напряжением, варикап, транзистор, октавная перестройка, фазовый шум, регулировочная характеристика.

Один из привлекательных и эффективных методов сверхширокополосного синтеза частот, столь широко используемого в радиоэлектронике, состоит в сочетании октавного синтезатора с ФАПЧ и набора масштабирующих умножителей и/или делителей частоты. Отсутствие коммерческих отечественных октавных генераторов СВЧ и высокая цена импортных генераторов заставили автора разработать октавный ГУН с диапазоном перестройки 1–2 ГГц. Первый опыт разработки такого ГУН, взятого за прототип в настоящей работе, описан автором в [1]. В результате в фирме «Микран» было начато серийное производство таких ГУН для применения в составе измерительной и связанной аппаратуры производства фирмы «Микран». Дальнейшие поиски в области оптимизации ГУН диапазона 1–2 ГГц для октавных синтезаторов частот привели автора к необходимости разработки ГУН с повышенной крутизной частотной регулировочной характеристики.

Идея заключается в применении варикапов с необходимым коэффициентом перекрытия в диапазоне напряжений смещения от 0,3–0,5 до 4–4,5 (в прототипе от 1,8 до 18 В). Этот диапазон соответствует применяемым фирмой «Микран» малошумящим микросхемам ФАПЧ. Такой ГУН не предполагает в канале управления соответствующего синтезатора наличия интегратора на операционном усилителе (ОУ) и двуполярного питания последнего стабильными относительно высокими напряжениями. Кроме того, будут дополнительно подавлены побочные спектральные составляющие, обусловленные входными токами утечки ОУ, и увеличена скорость перестройки синтезатора по частоте.

Появление варикапов со сверхрезким переходом даёт возможность реализовать эту идею. Платой за существенно большую простоту применения такого ГУН в синтезаторе, возможно, будет повышение фазового шума относительно прототипа на 5–10 дБ из-за относительно низкой добротности варикапов. Однако в большинстве применений уровень фазового шума не является основным критерием выбора ГУН. Например, в синтезаторах частот для систем связи или для некоторых измерительных приборов (скалярные и векторные анализаторы цепей) нет необходимости бороться за предельно низкий фазовый шум ГУН. В первом случае «область интересов системы» заканчивается на отстройках 10–20 кГц, где фазовый шум в большей степени определяется опорным генератором и фазовым дискриминатором. Во втором случае необходим гармонический сигнал с высокой долговременной стабильностью частоты. Фазовый же шум сигнала характеризует кратковременную стабильность частоты и либо не оказывает влияния на результат измерений, либо его вклад в погрешность измерения очень мал, по сравнению с другими факторами. Здесь необходимо простое и дешёвое техническое решение, реализовать которое можно с помощью ГУН, описываемого в данной статье.

### Требования к октавному ГУН

Для большинства приложений основными характеристиками ГУН являются:

- 1) спектральная плотность мощности (СПМ) фазового шума и степень ее зависимости от частоты генерации;
- 2) линейность частотной регулировочной характеристики;
- 3) диапазон частот генерации и соответствующий диапазон напряжений управления;
- 4) равномерность выходной мощности по частоте;
- 5) уровень гармоник несущей;
- 6) чувствительность выходной частоты к изменениям напряжения питания;
- 7) чувствительность выходной частоты к изменениям характера нагрузки.

Прокомментирую выполнимость соответствующих требований. В работе выдвигается особое требование к крутизне частотной регулировочной характеристики (далее – крутизне) ГУН. Диапазон частот генерации должен перекрываться при изменении напряжения смещения варикапов от 0–0,5 до 4,5–5 В. Средняя крутизна должна быть от 200 до 250 МГц/В. Столь высокой крутизной не обладает ни один из серийно выпускаемых коммерческих ГУН. Из ближайших зарубежных аналогов можно выделить V585ME06-LF Z-Communications и DCMO100230-5 Synergy Microwave Corp. Но и эти генераторы, впрочем, как и наш прототип, имеют среднюю крутизну от 50 до 80 МГц/В.

Причиной столь жесткого требования к крутизне является стремление удешевить применение ГУН в синтезаторе и обеспечить перспективы по снижению шума синтезатора в целом. В результате, удаётся избавиться от интегратора на ОУ и сопутствующих ему «высоковольтных» цепей питания. Как следствие отказа от ОУ – исключение вносимого им шума, который сравним или превосходит собственный фазовый шум ГУН и нивелирует попытки снизить шум синтезатора в целом применением менее шумящего ГУН.

Платой за высокую крутизну может быть не только ухудшение фазового шума ГУН, но и увеличение неравномерности выходной мощности по диапазону и нелинейности регулировочной характеристики. Как показала практика, обмен крутизны на другие характеристики во многих случаях оказывается выгодным или равноценным.

Добиться высокой линейности регулировочной характеристики ГУН в рабочем диапазоне напряжений невозможно. Причины этого – существенная нелинейность вольт-фарадной характеристики варикапов в области малых напряжений смещения, её вырождение в горизонтальную линию в области больших напряжений и влияние шунтирующей ёмкости активного элемента. Считается приемлемым изменение крутизны по диапазону в три раза. В данном случае следует ожидать существенной неравномерности крутизны.

Равномерность выходной мощности ГУН определяет итоговую равномерность выходной мощности синтезатора. Часто эти две величины равны или отличаются на 1–2 дБ. Низкая неравномерность мощности ГУН избавляет от применения системы АРМ или эквалайзеров. Приемлемой считается неравномерность мощности 3–4 дБ.

Уровень гармоник, как и остальные два параметра списка характеристик, приходится учитывать при разработке принципиальной схемы синтезатора. Исходя из данных по этим характеристикам, принимают решения о применении фильтров выходного сигнала для подавления гармоник, о необходимости подавления шумов напряжения питания, о согласовании нагрузки генератора.

#### **Критерии выбора элементов генератора**

Оптимальный выбор типа резонатора, активного элемента и схемы построения генератора СВЧ описан во многих работах (см., например, [2, 3]). Широкополосные ГУН строятся преимущественно с резонаторами на сосредоточенных элементах. В качестве индуктивности резонатора может выступать либо отрезок микрополосковой линии, либо катушка индуктивности.

Активный элемент, транзистор, выбирается исходя из известного соотношения между частотой генерации и граничной частотой усиления по току. Тип транзистора выбирается исходя из диапазона частот генерации и требований к фазовому шуму на отстройках до 10–100 кГц. Наименьший фазовый шум на указанных отстройках до частот генерации 10–15 ГГц позволяет получить кремниевые биполярные (например, NE68819, NE68839, NE68133 и т.п.) или кремний-германиевые гетеробиполярные транзисторы (например, BFP650, NESG2101, BFP450 и т.п.). Для ГУН 1–2 ГГц могут использоваться кремниевые транзисторы с граничной частотой усиления по току 6–10 ГГц.

Реализуя резонатор генератора на сосредоточенных элементах – с варикапами, описанными выше, сталкиваются с названным выше ограничением по уровню фазового шума в системе синтезатора частот из-за казалось бы неизбежного присутствия ОУ. Преодолеть это ограничение можно, отказавшись от ОУ, но это потребует увеличения крутизны регулировочной характеристики, а зна-

чит, перехода к другим варикапам в резонаторе: если в прототипе [1] использованы варикапы с резким переходом (BB555), то для нового генератора необходимы варикапы со сверхрезким переходом. Такие варикапы характеризуются меньшими добротностями. Поэтому следует ожидать некоторого ухудшения собственного фазового шума генератора по сравнению с прототипом.

Для получения коэффициента перекрытия варикапов, как в прототипе, но в диапазоне напряжений смещения от 0,5 до 4,5 В нужно, чтобы вольт-фарадная характеристика варикапа спадала в пять раз быстрее. Добротность варикапов для обеспечения устойчивой генерации и низкого фазового шума оставалась (по возможности) неизменной. Таким очевидным критерием автор руководствовался при поиске варикапов. Один из найденных варикапов (KDV368F) был опробован в модели и в опытных образцах.

### Расчёт характеристик ГУН

Из соображений преемственности ГУН собран на той же печатной плате, что прототип. Таким образом, схема и топология модели остались неизменными (рис. 1). Несколько изменились номиналы элементов для обеспечения устойчивой генерации в низкочастотной части диапазона. Для повышения точности расчётов использовались Spice-модели реальных элементов, учитывались топология печатной платы ГУН и вклад отрезков линий передачи разной длины, соединяющих компоненты. Для наглядности эти отрезки показаны на рис. 1. Расчёты характеристик и оптимизация схемы проводились в специализированном программном обеспечении. Результаты расчетов ГУН показаны на рис. 2.

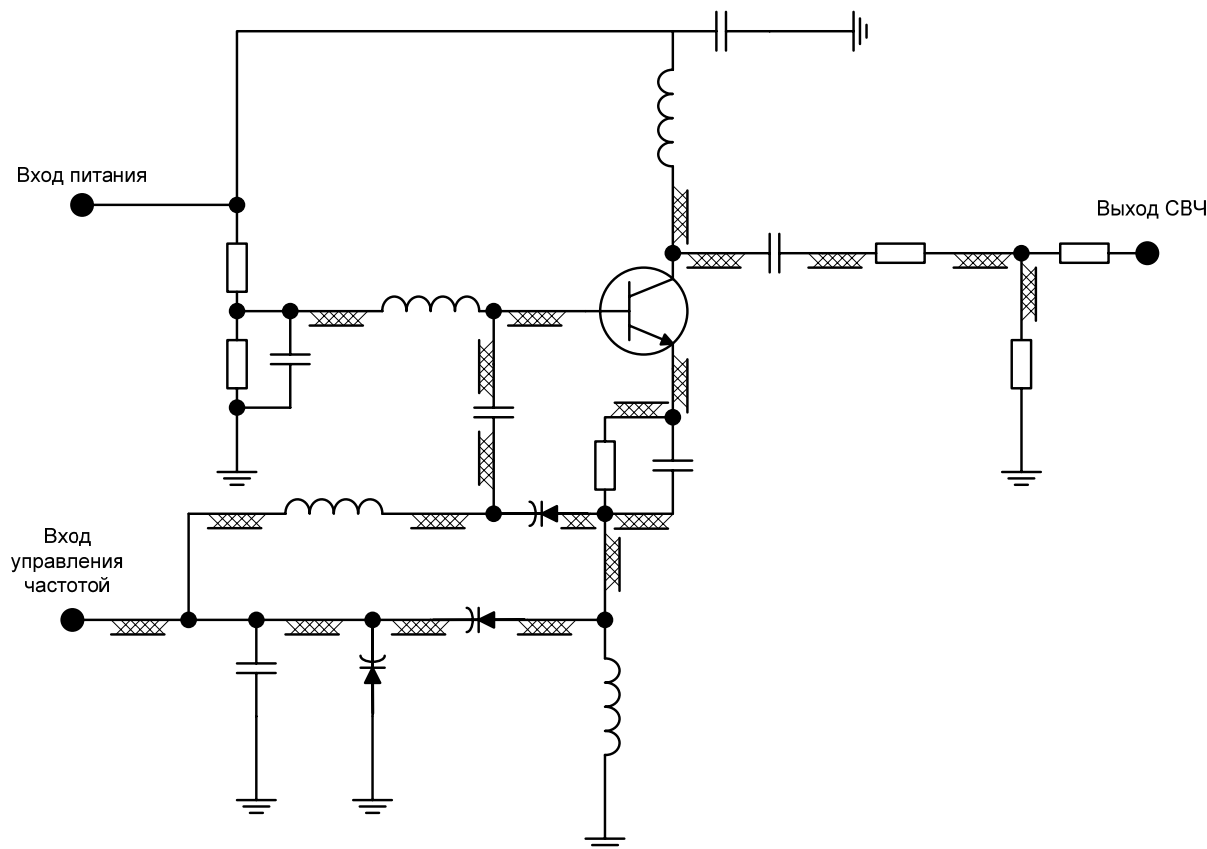


Рис. 1. Схема ГУН

Как видно из рисунка, ГУН перекрывает диапазон частот 1–2 ГГц при напряжениях управления от 0,4 до 4,2 В. Крутизна регулировочной характеристики укладывается в допустимые пределы и изменяется почти в три раза, а частотная неравномерность мощности 5 дБ достаточно велика. Добротность варикапа в два-три раза ниже, чем у прототипа, что сказалось на уровне фазового шума генератора, который выше на 5 дБ и колеблется в пределах 10 дБ. Потребляемый ток, как это часто бывает со сверхширокополосными ГУН, существенно меняется из-за изменения условий работы транзистора в схеме.

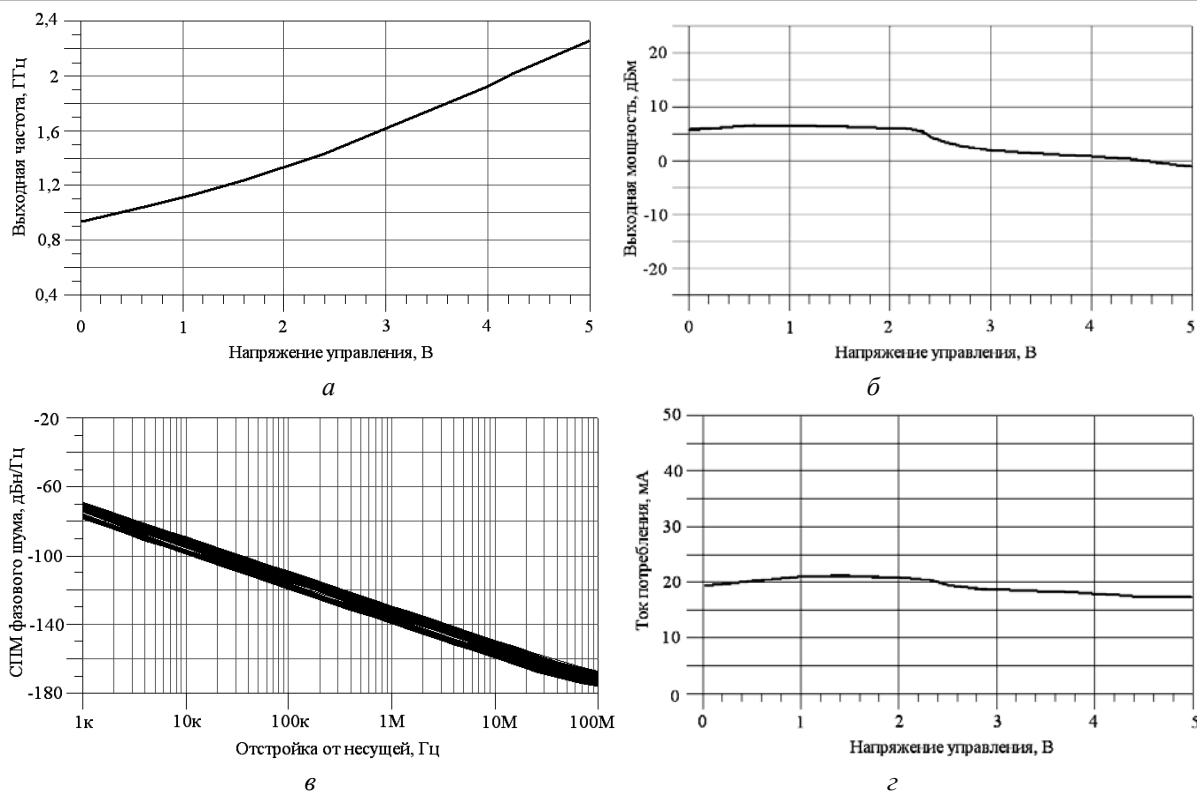


Рис. 2. Расчётные характеристики ГУН: а – частотная регулировочная характеристика; б – зависимость выходной мощности от напряжения управления; в – семейство характеристик фазовых шумов при разных напряжениях управления; г – зависимость тока потребления от напряжения управления

### Результаты экспериментов

После сборки и настройки были проведены испытания ГУН. Опытные образцы ГУН были испытаны не только на соответствие результатам расчётов, но и на устойчивость к внешним воздействиям: изменению температуры, напряжения питания, характера нагрузки.

На рис. 3 показаны экспериментальные характеристики ГУН.

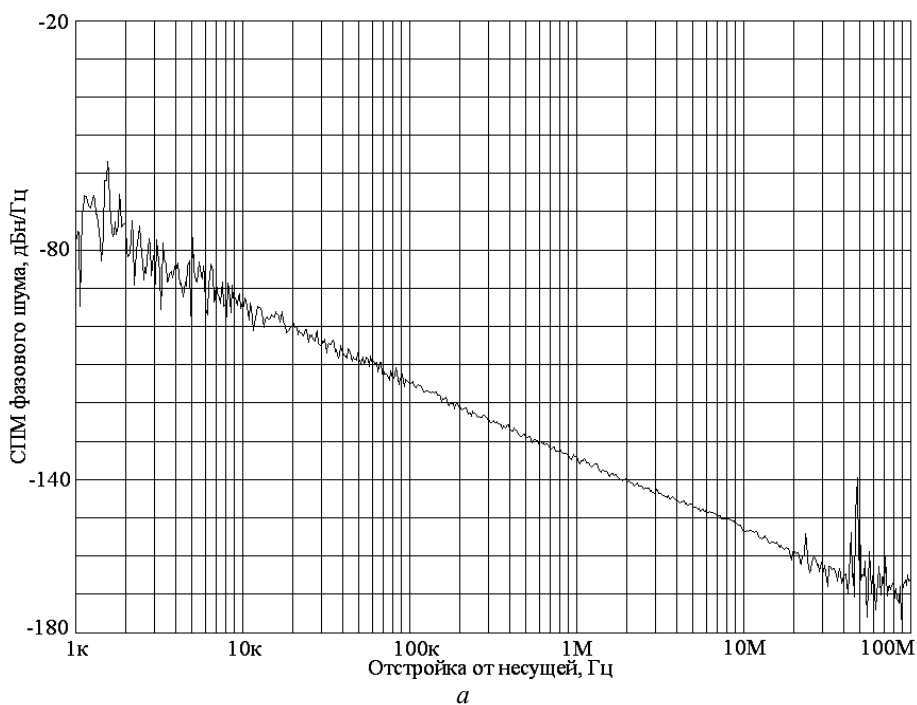


Рис. 3 (начало)

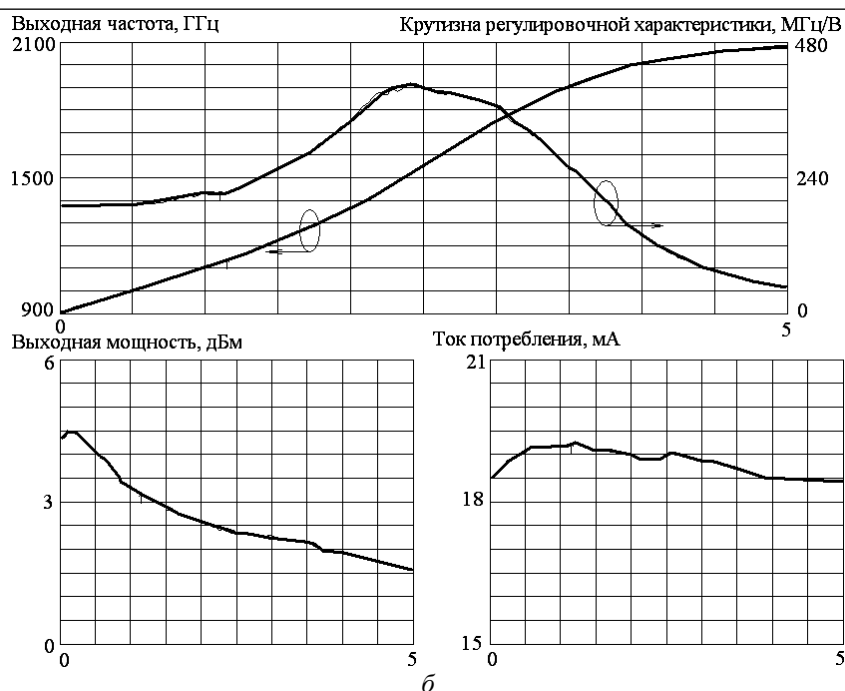


Рис. 3 (окончание). Экспериментальные характеристики ГУН 1–2 ГГц: *a* – характеристика СПМ фазового шума на частоте 1 ГГц; *б* – регулировочная характеристика, её крутизна и зависимости выходной мощности и тока потребления от напряжения управления

Из сравнения рис. 2 и 3 видно, что модель существенно расходится с реальным устройством. Это связано с отсутствием адекватной модели для варикапов. Обычно производители публикуют параметры SPICE-моделей варикапов. В нашем случае параметры приходилось подбирать по виду характеристик варикапов, и не всегда они совпадали с характеристиками модели. Расхождения привели к существенным различиям между расчётами и экспериментом.

Уровень гармоник измерялся в трёх точках диапазона и не превосходил минус 15 дБ по отношению к первой. Также проводились измерения чувствительности частоты ГУН к изменению характера нагрузки: при  $KCB_{нагр} < 2$  не более 10 МГц; к изменению напряжения питания: не более 16 МГц/В и к изменению температуры: не более 20 МГц в диапазоне температур от минус 40 до плюс 85 °С.

Следует признать, что характеристики собранных ГУН оказались лучше, чем у модели: неравномерность мощности 3 дБ, потребляемый ток не выше 20 мА.

Новый ГУН проигрывает прототипу по уровню выходной мощности (5 дБ) и её неравномерности (1 дБ), уровню фазовых шумов (5–10 дБ) и чувствительности к изменению напряжению питания (почти в десять раз). Но, как было сказано выше, не везде необходимо ГУН с минимальным фазовым шумом. Иногда нужно простое и дешёвое решение, пусть и с несколько худшими характеристиками, которое и позволяет реализовать разработанный ГУН. Возможно, в будущем будут разработаны варикапы с большей добротностью и фазовый шум будет снижен до уровня прототипа.

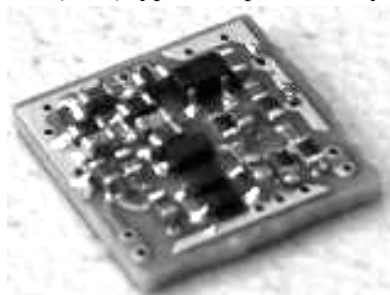


Рис. 4. Фото ГУН

ГУН реализован на печатной плате из фольгированного диэлектрика типа Rogers размерами 7,5×7,5 мм толщиной 0,8 мм. По внешнему виду он не отличается от прототипа (рис. 4).

### Заключение

В ходе разработки были подобраны варикапы для ГУН, позволяющие перекрыть диапазон частот 1–2 ГГц при напряжениях смещения до 5 В. Это позволяет существенно упростить схему синтезатора частот, в котором будет работать ГУН, и улучшить его характеристики: уровень побочных спектральных составляющих и скорость перестройки по частоте. Разработанный ГУН, по видимому, не имеет аналогов в мире по крутизне частотной регулировочной характеристики.

*Литература*

1. Андронов Е.В. Генератор диапазона 1–2 ГГц с резонатором на сосредоточенных элементах для октавных синтезаторов частот / Е.В. Андронов, А.В. Горевой // Обмен опытом в области создания сверхширокополосных РЭС: матер. 3-й Общерос. науч.-техн. конф. (Омск) – Омск: ОАО «ЦКБА», 2010. – С. 24–29.
2. Andrei Grebennikov. RF and Microwave Transistor Oscillator design / John Wiley & Sons, Ltd. – Chichester: England, 2007. – 441 p.
3. Rohde U.L. The Design Of Modern Microwave Oscillators For Wireless Applications / Ulrich L. Rohde, Ajay Kumar Poddar, Georg Böck. – New Jersey, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2005. – 543 p.

---

**Горевой Андрей Викторович**

Инженер ДИИС ЗАО «НПФ «Микран», г. Томск

Тел.: (382-2) 90-00-35

Эл. почта: imz@micran.ru

Gorevoy A.V.

**VCO 1-2 GHz with increased tuning sensitivity**

The paper confirms the possibility to build a VCO 1–2 GHz with increased tuning sensitivity. The set of system requirements to VCO has been specified and similar variants of VCOs have been considered. After the investigation of different VCO schemes from well-known manufacturers, an own VCO scheme has been suggested. When the requirements to CV curve has been specified, the exact varactor diode has been selected. The constructed VCO allows to achieve an octave tuning using control voltage range from 0 to 5 V.

**Keywords:** voltage controlled oscillator, varactor diode, transistor, octave tuning, phase noise, regulation curve.

---