

КОМБИНИРОВАННЫЕ СОЕДИНЕНИЯ ЕМКОСТЕЙ Р-П ПЕРЕХОДОВ

В. К. Дущенко

Харьков

Емкости р-п переходов широко используются в различных схемах. Такая емкость обычно описывается функцией

$$C = C_0 \left(1 + \frac{E_{см}}{\varphi_k} \right)^{-n}, \quad (1)$$

где C_0 — емкость при $E_{см} = 0$;

$E_{см}$ — напряжение смещения;

φ_k — контактная разность потенциалов;

n — постоянный коэффициент, определяемый геометрией перехода.

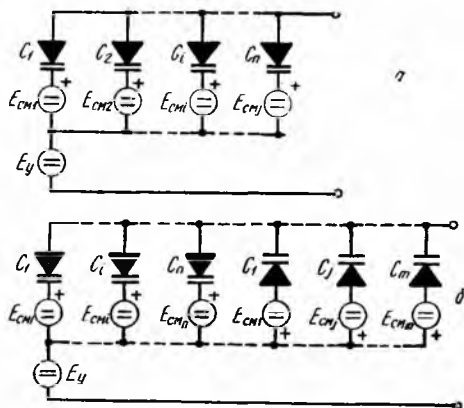


Рис. 1. Общий случай параллельного соединения емкостей:

а — обычное, б — смешанное.

В некоторых случаях необходимо иметь емкость с заданной зависимостью от напряжения.

Ниже рассмотрены комбинированные соединения сплавных р-п переходов, для которых коэффициент n в выражении (1) равен 0,5, но полученные результаты могут быть распространены на р-п переходы с любой зависимостью емкости от напряжения.

В параллельном соединении следует различать обычное соединение (рис. 1, а) и то, которое условно может быть названо параллельным смешанным (рис. 1, б), когда увеличение смещения приводит к увеличению емкости одной группы емкостей соединения и к уменьшению емкости другой.

В первом случае закон изменения результирующей емкости при изменении смещения остается тем же, что и для единичной, а максимальная оказывается равной сумме максимальных емкостей группы. Результирующая емкость для группы из n емкостей

$$C_{общ} = \frac{C_{0cp}}{\sqrt{1 + a_{cp}}} \sum_{i=1}^n \frac{C_{0i}}{C_{0cp}} \sqrt{\frac{1 + a_{cp}}{1 + a_i}}$$

и для обычного параллельного соединения двух емкостей

$$C_{общ} = \frac{C_{01}}{\sqrt{1 + a + b}} \left(1 + \sqrt{k} \frac{C_{02}}{C_{01}} \sqrt{\frac{1 + \frac{b}{1 + a_1}}{\frac{kb}{1 + \frac{1}{1 + a_1}}}} \right), \quad (2)$$

где

$$a_1 = \frac{E_{cm1}}{\varphi_{k1}}; \quad b = \frac{E_y}{\varphi_k}; \quad k = \frac{1 + a_1}{1 + a_2}.$$

Для параллельного смешанного соединения в общем случае выражение для результирующей емкости имеет вид

$$C_{\text{общ}} = \frac{C_{0cp_1}}{\sqrt{1 + a_{cp_1}}} \sum_{i=1}^n \frac{C_{0i}}{C_{0cp_1}} \sqrt{\frac{1 + a_{cp_1}}{1 + a_i}} + \frac{C_{0cp_2}}{\sqrt{1 + a_{cp_2}}} \sum_{j=1}^m \frac{C_{0j}}{C_{0cp_2}} \sqrt{\frac{1 + a_{cp_2}}{1 + a_j}}.$$

При практических расчетах целесообразнее для групп n и m емкостей рассчитать эквивалентные емкости, которые должны иметь закон изменения емкости, подобный одиночной, и оперировать только двумя емкостями с параллельным смешанным соединением. Тогда выражение для результирующей емкости

$$\frac{C_{0\text{общ}}}{C_{1\text{нач}}} = \frac{\sqrt{k} \frac{C_{02}}{C_{01}}}{\sqrt{1 - \frac{kb}{1 + a_1}}} + \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{b}{1 + a_1}}}, \quad (3)$$

где $C_{1\text{нач}} = \frac{C_{01}}{\sqrt{1 + a_1}}$ — начальная емкость первого конденсатора,

$k = \frac{1 + a_1}{1 + a_2}$ — соотношение постоянных смещений на емкостях.

Экстремальное (минимальное) значение емкости (для случая $\frac{C_{02}}{C_{01}} = 1$) определяется из уравнения

$$\frac{C_{\text{мин}}}{C_{1\text{нач}}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{b}{1 + a_1}\right)_{\text{опт}}}} + \frac{\sqrt{k}}{\sqrt{1 - k \left(\frac{b}{1 + a_1}\right)_{\text{опт}}}}, \quad (4)$$

а величина смещения, соответствующая этому значению, — из выражения

$$\left(\frac{b}{1 + a_1}\right)_{\text{опт}} = \frac{2}{\sqrt{k}} \operatorname{sh} \left(\frac{1}{3} \operatorname{arcsh} \frac{3}{8\sqrt{k}} \right). \quad (5)$$

Зависимость (3) может быть аппроксимирована для удобства практических выкладок простым выражением

$$C_{\text{общ}} = \alpha b^2 + \beta b + \gamma, \quad (6)$$

которое более справедливо в том случае, если используется зависимость емкости от напряжения, приближающаяся к параболической.

Постоянные коэффициенты α , β , γ , входящие в выражение (6), могут быть представлены в зависимости от параметров входящих емкостей как

$$\gamma = C_{1\text{нач}} \left(\sqrt{k} \frac{C_{02}}{C_{01}} + 1 \right),$$

$$\alpha = \frac{1}{\left(\frac{b}{1 + a_1}\right)_{\text{опт}}^2} \left[\gamma - C_{1\text{нач}} \left(\frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{b}{1 + a_1}\right)_{\text{опт}}}} + \frac{\sqrt{k}}{\sqrt{1 - k \left(\frac{b}{1 + a_1}\right)_{\text{опт}}}} \right) \right],$$

$$\beta = -2\alpha \left(\frac{b}{1 + a_1} \right)_{\text{опт}}.$$

Зависимость результирующей емкости от напряжения более пологая, чем одиночной, и при определенных соотношениях параметров входящих емкостей можно добиться того, что в большей части рабочего диапазона смещений емкость оказывается независимой от напряжения. В последовательном соединении емкостей также можно выделить два подтипа: обычное и встречное, когда смещение для одного из переходов является прямым и он работает как чисто активное сопротивление, а для второго — обратным и он определяет емкостные свойства соединения.

Для обычного последовательного соединения рис. 2, а в общем случае результирующая емкость может быть представлена как

$$\frac{1}{C_{\text{общ}}} = \sqrt{1 + \frac{a}{n} + \frac{b}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_{0i}}}. \quad (7)$$

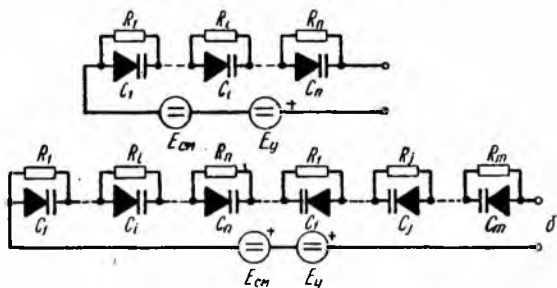


Рис. 2. Последовательное соединение емкостей:
а — обычное, б — встречное.

При обычном последовательном соединении только двух емкостей выражение для результирующей емкости при небольшом разбросе сопротивлений утечки имеет вид

$$\frac{C_{01}}{C_{\text{общ}}} = \sqrt{1 + \frac{a}{1 + \frac{R_2}{R_1}}} \left(1 + \frac{C_{01}}{C_{02}} \sqrt{\frac{R_2}{R_1}}\right). \quad (8)$$

Как видно из выражений (7) и (8), для обычного последовательного соединения емкостей характерно уменьшение максимальной результирующей емкости, и при том же законе зависимости емкости от смещения рабочий диапазон смещений увеличивается в n раз. Значительный разброс сопротивлений утечки переходов понижает теоретически возможный диапазон смещений, вызывая зенеровский пробой при больших смещениях того перехода, который имеет наибольшее сопротивление утечки.

Расчет встречного включения нескольких переходов (рис. 2, б) может быть сведен к предварительному расчету двух групп обычного последовательного соединения переходов, так как в этом случае при данном знаке смещения работает только одна из групп переходов. Для другой же группы смещение является прямым, и она представляет собой почти активное сопротивление, включаемое последовательно с сопротивлением потерь емкостей группы переходов. При смене знака смещения группы меняются местами. Закон изменения результирующей емкости при малых по абсолютной величине смещениях может быть рассчитан в следующей последовательности. Зная зависимость сопротивления перехода от напряжения на нем, можно определить, какую часть общего смещения составляет падение напряжения на данном переходе и, подставив

его в выражение для результирующей емкости двух навстречу включенных переходов, получим выражение для общей емкости

$$\frac{C_o}{C_{\text{общ}}} = \frac{1}{m_2} \sqrt{1 + \frac{1}{n_2} \frac{E_{\text{см}}}{\varphi_k} \psi_2} + \frac{1}{m_1} \sqrt{1 - \frac{1}{n_1} \frac{E_{\text{см}}}{\varphi_k} \psi_1}, \quad (9)$$

где m_1 и m_2 — коэффициенты, учитывающие разброс максимальных емкостей переходов;

n_1 и n_2 — коэффициенты, учитывающие разброс переходов по контактной разности потенциалов;

ψ_1 и ψ_2 — функции, с помощью которых производится учет знака смещения для данного перехода, определяются из уравнений

$$\psi_1 = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\text{sh} \frac{qE_{\text{см}}}{kT}}{1 + \text{ch} \frac{qE_{\text{см}}}{kT}} \right), \quad (10)$$

$$\psi_2 = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\text{sh} \frac{qE_{\text{см}}}{kT}}{1 + \text{ch} \frac{qE_{\text{см}}}{kT}} \right). \quad (11)$$

Функции ψ_1 и ψ_2 меняются при изменении $E_{\text{см}}$ от нуля до единицы и являются своего рода функциями-переключателями. Учет их должен производиться при

$$4 \leq \frac{qE_{\text{см}}}{kT} \leq -4,$$

что соответствует при комнатной температуре общим смещениям в пределах $0,1 \leq E_{\text{см}} \leq -0,1$ в.

Выражение для результирующей емкости (9) достаточно громоздко, поэтому была подобрана более простая аппроксимирующая функция:

$$\frac{C_o}{C_{\text{общ}}} = 2 \text{ch} a \sqrt[3]{\frac{E_{\text{см}}}{\varphi_k}}, \quad (12)$$

где $a = 0,7 - 0,9$ — постоянный коэффициент.

Получаемая при этом погрешность аппроксимации не превышает 2—3% в диапазоне смещений $8 \geq \frac{E_{\text{см}}}{\varphi_k} \geq -8$.

В некоторых случаях требуется электрическая регулировка емкости с помощью постоянного управляющего напряжения. Вместе с тем необходимо, чтобы на результирующую емкость переменная составляющая сигнала оказывала минимальное влияние. Обычно это бывает, когда емкость перехода используется в качестве контурной. Если не принимать никаких мер, то в силу нелинейности контура с увеличением амплитуды сигнала появляются значительные искажения последнего.

Наиболее простой и действенный способ устранения влияния переменной составляющей на результирующую емкость — применение комбинированных соединений емкостей, которые по отношению к переменной составляющей емкости включены таким образом, что если одна из них увеличивается, то другая уменьшается. Вполне очевидно, что полная компенсация переменной составляющей возможна только при идентичных емкостях с линейной зависимостью от их напряжения. Для рассматри-

ваемого типа емкостей полная компенсация невозможна, однако применение описываемых ниже соединений позволяет в значительной степени подавить переменную составляющую.

Все возможные способы компенсации могут быть сведены к двум. В первом случае емкость контура представляет собой параллельное смешанное соединение емкостей, для которого характерно наличие экстремального значения (минимум) емкости в рабочем диапазоне напряжений.

Параметры составляющих емкостей могут быть подобраны так, что этот минимум оказывается выраженным нерезко. Это позволяет выделить диапазон напряжений, в котором результирующая емкость оказывается фактически независимой от напряжения. Управление же емкостью по постоянному току осуществляется соответствующим изменением напряжений обоих источников смещения одновременно.

Во втором случае по регулируемому напряжению емкости включены последовательно, по переменному напряжению — смешанно-параллельно.

Применительно к рассматриваемому варианту описывающее его выражение примет вид

$$\frac{1}{C_{\text{общ}}} = \frac{1}{\sqrt{R_1 + R_2}} \left(\frac{\sqrt{R_1}}{C_{01}} \sqrt{1 + a + b} + \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{\sqrt{R_2}}{C_{02}} \sqrt{1 + a - b + \frac{R_1}{R_2}} \right). \quad (13)$$

Наилучшая компенсация при

$$\frac{\sqrt{R_1}}{C_{01}} = \frac{\sqrt{R_2}}{C_{02}}, \quad (14)$$

так как представив корни в скобках выражения (13) в виде степенного ряда, можно сократить члены разложения с нечетными степенями, а соотношение (14) будет служить критерием по подбору сопротивлений или переходов, если сопротивления применять нежелательно. Для неидентичных переходов компенсация оптимальная при производной выражения (13) по b , равной нулю. Это наблюдается при малом сигнале, когда

$$\frac{\sqrt{R_1}}{C_{01}} \sqrt{1 + a + \frac{R_1}{R_2}} = \frac{\sqrt{R_2}}{C_{02}} \sqrt{1 + a + \frac{R_2}{R_1}}. \quad (15)$$

Приведенный анализ простейших соединений позволяет непосредственно перейти к синтезу емкости с заданной зависимостью ее от напряжения. Процесс синтеза рассматривается в такой последовательности: сначала по требуемой зависимости подбираются типы соединений, затем определяются численные значения параметров, для которых приближение к заданной функции оказывается наилучшим. Обычно выбирают соединение из числа наиболее простых, сравнивая их графики с заданной зависимостью. Так как сходство графиков, определяемое на глаз, может оказаться об-

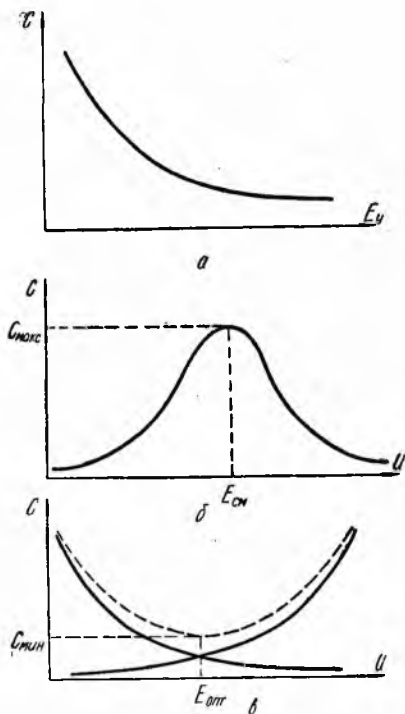


Рис. 3. Общие характеристики простейших соединений нелинейных емкостей:

а — обычные параллельные и последовательные, б — последовательные встречные, в — смешанные параллельные.

манчивым, следует, выбрав какую-либо формулу, прежде чем определять значения параметров, проверить возможность ее применения по методу выравнивания.

При рассмотрении графиков нужно учитывать что, как правило, используется лишь часть, соответствующая некоторому интервалу изменения напряжений, а не весь диапазон.

Обобщенные графики зависимости емкости различных соединений от напряжения показывают (рис. 3), что встречное соединение может быть использовано для создания экстремальных значений (максимума) емкости внутри рабочего диапазона напряжений. Минимум функций, а также участки, где емкость не зависит от напряжения, обеспечивается параллельно-смешанными соединениями.

Общее выражение для синтеза заданной зависимости емкости от напряжения предложить невозможно, в каждом конкретном случае имеется свое решение этой задачи.
