

У. С. ВАЛЕЕВ
(Новосибирск)

НЕРЕЗОНАНСНОЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ УСИЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ НА ПЕРЕМЕННОЙ ЕМКОСТИ

В известном способе электрометрии с динамическим конденсатором принято последний соединять с высокоомным источником измеряемых зарядов (разностей потенциалов) через последовательное высокоомное развязывающее сопротивление. Тем самым, несмотря на изменения (модуляцию) величины емкости динамического конденсатора, обеспечивается постоянство определенного для данного момента времени значения заряда на динамическом конденсаторе. Напряжение на динамическом конденсаторе модулируется, и модулированная часть передается через конденсатор связи на вход усилителя. Как известно, коэффициент эффективности преобразования η динамического конденсатора, представляющий собой отношение амплитуды выходного переменного сигнала к амплитуде входного сигнала, определяется через максимальное C_{\max} и минимальное C_{\min} значения динамического конденсатора, как

$$\eta = \frac{C_{\max} - C_{\min}}{C_{\max} + C_{\min}}$$

Причем ясно, что η всегда меньше единицы. Практически этот коэффициент имеет порядок 0,2—0,4, а если учитывать шунтирующее влияние сопротивления входа и паразитных емкостей, то реальное его значение становится еще меньше.

В последнее время для усиления низкочастотных электрических сигналов в качестве динамического конденсатора стали использовать емкости переходов полупроводниковых диодов в различных схемах, в частности в схемах нерезонансного параметрического усиления [1]. Несмотря на многообразие этих схем, в основу всех их положен принцип постоянства заряда на модулируемой емкости за счет ее включения к источнику сигнала через развязывающее сопротивление, что неизбежно, как уже говорилось, ведет к ослаблению сигнала при его преобразовании переменной емкостью.

Здесь описывается способ нерезонансного параметрического усиления по типу модулятор — демодулятор, в котором имеет место усиление сигнала не только по мощности, но и по напряжению, в результате чего повышается чувствительность.

Одна из схем известного использования переменной емкости для параметрического усиления приведена на рис. 1, где $U_{вх}$ — э. д. с.

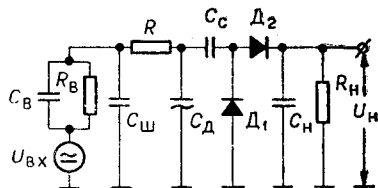


Рис. 1.

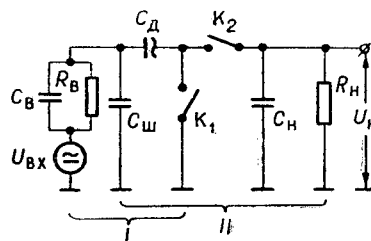


Рис. 2.

вающее сопротивление R ; два ключа K_1 и K_2 обеспечивают малое сопротивление в замкнутом состоянии и высокое сопротивление изоляции концов в разомкнутом. Эти ключи при определенных условиях могут быть заменены двумя подходящими полупроводниковыми диодами. Принцип усиления напряжения при этом способе заключается в следующем. В период возрастания емкости динамического конденсатора с помощью ключа K_1 (см. рис. 2) образуют замкнутую цепь (источник усиливаемых напряжений — переменный конденсатор), которую разрывают в момент достижения максимального значения емкости переменного конденсатора. Это первая фаза цикла. В период уменьшения емкости переменного конденсатора с помощью ключа K_2 образуют замкнутую последовательную цепь из переменного конденсатора, источника усиливаемых напряжений и нагрузки. Эту цепь разрывают в момент достижения минимального значения емкости переменного конденсатора (вторая фаза цикла), и перечисленные операции повторяют с периодом изменения емкости переменного конденсатора. При этих операциях происходит сначала зарядка переменного конденсатора непосредственно от источника максимальным количеством заряда с последующей отдачей большей части этого заряда нагрузке через источник. Напряжение, развиваемое переменным конденсатором, и количество отданного нагрузке заряда зависят от соотношения емкостей, особенно от минимального значения емкости переменного конденсатора, причем напряжение на переменном конденсаторе в момент минимума емкости может многократно превышать по амплитуде амплитуду входного напряжения. Перейдем к теоретическому рассмотрению процесса усиления. Математическое описание этого процесса через систему нелинейных дифференциальных уравнений не представляет трудностей, но получающаяся система не решается в квадратурах. Использованное нами решение может представить определенный интерес и поэтому приводится по возможности полно.

Вывод основной формулы для выходного сигнала. Выражение для напряжения на нагрузке U_H найдем в результате последовательного суммирования вкладов выбрасываемых в нагрузку за каждый цикл изменения емкости переменного конденсатора зарядов. С этой целью последовательно для обеих фаз каждого цикла будем решать систему трех уравнений для напряжений в контурах и зарядов.

Значения постоянных времени цепей нагрузки и источника ограничим условием

$$R_n C_n \gg \tau, \quad R_b C_b \ll \tau, \quad (1)$$

где τ — период изменения емкости динамического конденсатора. В этом случае электрические процессы в цепях за время одной фазы циклов ($\tau/2$) практически не будут зависеть от омических сопротивлений R_n и R_b , индуктивности цепей пренебрежимо малы, и заряды на емкостях будут определяться лишь напряжениями и значениями емкостей в момент прерывания цепи. На основании этого функциональная зависимость емкости переменного конденсатора от времени может быть произвольной, так что в нашем случае достаточно знание максимального C_{\max} и минимального C_{\min} значений его емкости.

Длительность процесса накопления зарядов на емкости нагрузки C_n сравнима с постоянной времени нагрузки, поэтому необходимо учесть стекание зарядов через сопротивление нагрузки R_n . Для этого в уравнениях для контура, включающего нагрузку, достаточно учесть, что за промежуток времени, пока совершался k -й цикл переброски рассматриваемой порции заряда Δq_{dk} на емкость C_n , накопленный на ней за предшествующие циклы суммарный заряд $q_{n, k-1}$ уменьшится еще в $\exp(\tau/R_n C_n)$ раз, и выражения для заряда на C_n для k -го цикла в этих уравнениях запишем в виде

$$q_{n, k} = q_{n, k-1} e^{-\frac{\tau}{R_n C_n}} + \Delta q_{dk}. \quad (2)$$

После первого подключения переменной емкости C_d непосредственно к источнику в момент разрыва цепи, когда емкость динамического конденсатора максимальна (конец первой фазы 1-го цикла), для контуров I и II (см. рис. 2) будет иметь место система уравнений:

$$\begin{cases} q_{b1} \frac{1}{C_b} + q_{ш1} \frac{1}{C_{ш}} + U_{11} = 0; \\ -q_{ш1} \frac{1}{C_{ш}} + q_{d1} \frac{1}{C_{\max}} = 0; \\ q_{b1} = q_{ш1} + q_{d1}. \end{cases}$$

где U_{11} , q_{d1} , $q_{ш1}$, q_{b1} — напряжение источника и заряды соответственно на емкостях C_d , $C_{ш}$ и C_b в конце первой фазы 1-го цикла. Начальные значения зарядов на емкостях приняты равными нулю. Из этой системы находим:

$$q_{d1} = -U_{11} \frac{C_{\max} C_b}{C_{\max} + C_b + C_{ш}}; \quad q_{ш1} = -U_{11} \frac{C_{ш} C_b}{C_{\max} + C_b + C_{ш}}. \quad (3)$$

Для последовательной цепи из трех емкостей и источника в момент ее разрыва, когда емкость переменного конденсатора минимальна (конец второй фазы 1-го цикла), имеем:

$$\begin{cases} (q_{b1} + \Delta q_{b1}) \frac{1}{C_b} + (q_{ш1} + \Delta q_{ш1}) \frac{1}{C_{ш}} + U_{12} = 0; \\ -(q_{ш1} + \Delta q_{ш1}) \frac{1}{C_{ш}} + (q_{d1} + \Delta q_{d1}) \frac{1}{C_{\min}} + \Delta q_{d1} \frac{1}{C_n} = 0; \\ \Delta q_{b1} = \Delta q_{d1} + \Delta q_{ш1}. \end{cases} \quad (4)$$

Здесь U_{12} , Δq_{d1} , $\Delta q_{ш1}$, Δq_{b1} — напряжение источника и изменения заря-

дов соответственно на емкостях $C_A, C_{ш}, C_B$ в конце второй фазы 1-го цикла. Из системы уравнений (4) с учетом (3) находим:

$$\begin{aligned} \Delta q_{A1} &= \left(U_{11} \frac{C_{\min} + C_B + C_{ш}}{C_{\max} + C_B + C_{ш}} C_{\max} - U_{12} C_{\min} \right) \times \\ &\times \frac{C_B C_H}{C_{\min} C_H + C_B C_H + C_{ш} C_H + C_B C_{\min} + C_{ш} C_{\min}}; \\ \Delta q_{ш1} &= (U_{11} - U_{12}) \frac{C_B C_{ш}}{C_B + C_{ш}} - \Delta q_{A1} \frac{C_{ш}}{C_B + C_{ш}}. \end{aligned}$$

В конце первой фазы повторного цикла имеет место система уравнений, отличающаяся от предыдущей дополнительно появившимися зарядами $q_{B2}, q_{A2}, q_{ш2}$ и отсутствием члена с $1/C_H$:

$$\begin{cases} (q_{B1} + \Delta q_{B1} + q_{B2}) \frac{1}{C_B} + (q_{ш1} + \Delta q_{ш1} + q_{ш2}) \frac{1}{C_{ш}} + U_{21} = 0; \\ - (q_{ш1} + \Delta q_{ш1} + q_{ш2}) \frac{1}{C_{ш}} + (q_{A1} + \Delta q_{A1} + q_{A2}) \frac{1}{C_A} = 0; \\ q_{B2} = q_{ш2} + q_{A2}. \end{cases}$$

Решение этой системы следующее:

$$\begin{aligned} q_{A2} &= (U_{11} - U_{21}) \frac{C_{\max} C_B}{C_{\max} + C_B + C_{ш}} - \Delta q_{A1}; \\ q_{ш2} &= (U_{11} - U_{21}) \frac{C_B C_{ш}}{C_{\max} + C_B + C_{ш}} - \Delta q_{ш1}. \end{aligned} \quad (5)$$

В конце второй фазы 2-го цикла, когда $U_{вх} = U_{22}$, учитывая дополнительное изменение зарядов на $\Delta q_{A2}, \Delta q_{ш2}, \Delta q_{B2}$, а также учитывая (2), (3), (5), можем записать новую систему уравнений в виде

$$\begin{cases} \left(-U_{21} \frac{(C_{\max} + C_{ш}) C_B}{C_{\max} + C_B + C_{ш}} + \Delta q_{B2} \right) \frac{1}{C_B} + \\ + \left(-U_{21} \frac{C_B C_{ш}}{C_{\max} + C_B + C_{ш}} + \Delta q_{ш2} \right) \frac{1}{C_{ш}} + U_{22} = 0; \\ - \left(-U_{21} \frac{C_B C_{ш}}{C_{\max} + C_B + C_{ш}} + \Delta q_{ш2} \right) \frac{1}{C_{ш}} + \\ + \left(-U_{21} \frac{C_{\max} C_B}{C_{\max} + C_B + C_{ш}} + \Delta q_{A2} \right) \frac{1}{C_A} + q_{A2} \frac{1}{C_H} = 0; \\ \Delta q_{B2} = \Delta q_{A2} + \Delta q_{ш2}. \end{cases} \quad (6)$$

Отсюда

$$\begin{aligned} \Delta q_{A2} &= \left(U_{21} \frac{C_{\min} + C_B + C_{ш}}{C_{\max} + C_B + C_{ш}} C_{\max} - U_{22} C_{\min} \right) \times \\ &\times \frac{C_B C_H}{C_{\min} C_H + C_B C_H + C_{ш} C_H + C_B C_{\min} + C_{ш} C_{\min}} - \\ &- \Delta q_{A1} e^{-\frac{\tau}{R_H C_H}} \frac{C_{\min} (C_B + C_{ш})}{C_{\min} C_H + C_B C_H + C_{ш} C_H + C_B C_{\min} + C_{ш} C_{\min}}. \end{aligned} \quad (7)$$

Из рассмотренных двух циклов следует, что заряды, появляющиеся на внутренней емкости источника C_B , на переменной емкости C_A и шунтирующей емкости $C_{ш}$, нейтрализуются в последующей фазе цикла, в то

время как на емкости нагрузки C_H происходит накопление зарядов. Это существенная особенность описываемого процесса усиления. Именно благодаря такой нейтрализации зарядов эти емкости не ограничивают накопления заряда на емкости нагрузки. Математически, как нетрудно показать, это означает, что все последующие циклы в первой фазе дают изменения зарядов, описываемые выражениями, подобными (5), с соответствующими индексами циклов, во второй фазе циклы описываются системами, подобными (6), и имеют решения вида (7) с соответствующими индексами циклов. Общее выражение для накопленного за n циклов заряда q_{nn} получаем путем последовательных подстановок в уравнение (2) соответствующих значений зарядов, начиная с $\Delta q_{дn}$ и кончая $\Delta q_{д1}$. В результате для напряжения на нагрузке можем записать

$$U_H = C_B \sum_{k=1}^n \left(U_{k1} \frac{C_{\min} + C_B + C_{\text{ш}}}{C_{\max} + C_B + C_{\text{ш}}} C_{\max} - U_{k2} C_{\min} \right) \times \\ \times \frac{[(C_{\min} + C_B + C_{\text{ш}}) C_H \exp(-\tau / R_H C_H)]^{n-k}}{(C_{\min} C_H + C_B C_H + C_{\text{ш}} C_H + C_B C_{\min} + C_{\text{ш}} C_{\min})^{n-k+1}}. \quad (8)$$

Это общее выражение для выходного напряжения, справедливое при любых пределах изменения переменной емкости C_d , любой временной зависимости сигнала и для широкого класса источников сигнала и измерительных приборов, удовлетворяющих условию (1). В частном случае постоянных усиливаемых напряжений U_0 общее выражение (8) может быть представлено в виде

$$U_H = \frac{C_B (C_{\max} - C_{\min}) \left\{ 1 - \left[\frac{(C_{\min} + C_B + C_{\text{ш}}) C_H \exp(-\tau / R_H C_H)}{C_{\min} C_H + C_B C_H + C_{\text{ш}} C_H + C_B C_{\min} + C_{\text{ш}} C_{\min}} \right]^n \right\}}{(C_{\max} + C_B + C_{\text{ш}}) \left[C_{\min} + C_H \left(1 + \frac{C_{\min}}{C_B + C_{\text{ш}}} \right) (1 - e^{-\tau / R_H C_H}) \right]} U_0. \quad (9)$$

Выражение (9) применимо и для переменных напряжений, частота которых значительно меньше частоты изменения переменной емкости. В настоящее время уже имеются коммерческие динамические конденсаторы со сравнительно высокими (порядка 6 кгц) частотами накачки [2], а при использовании емкости переходов полупроводниковых диодов это условие легко выполняется.

Коэффициент усиления по напряжению. Функция перед U_0 в (9) есть не что иное, как коэффициент передачи или усиления K . При достаточно большом числе n повторения описанной операции, учитывая (1), можем записать

$$K \approx \frac{C_B C_{\max}}{C_{\min} (C_{\max} + C_B + C_{\text{ш}})} \quad (10)$$

т. е. при больших значениях отношения C_{\max}/C_{\min} переменной емкости коэффициент усиления может быть значительно больше единицы.

Если внутреннее сопротивление источника исчезающе мало, что эквивалентно $C_B \rightarrow \infty$, то последнее выражение перейдет в

$$K \approx \frac{C_{\max}}{C_{\min}} > 1. \quad (11)$$

Из (9), учитывая (1), найдем, что при $C_{\min} \rightarrow 0$ коэффициент усиления

стремится к пределу

$$K_n \rightarrow \left[\frac{C_n C_{\max} (1 - e^{-\frac{n\tau}{R_n C_n}}) R_n}{(C_{\max} + C_n + C_{ш}) \tau} \right]_{C_{\min} - 0}$$

Этот предел определяется в основном омическим сопротивлением нагрузки и частотой $(1/\tau)$ изменения емкости C_n и может быть очень большим. Из последнего выражения легко определить оптимальное число циклов $n_{\text{опт}}$. Если выбрать его значение из условия $K_n(n_{\text{опт}}) \approx 0,73 K_n(n \rightarrow \infty)$, то $n_{\text{опт}} = \frac{R_n C_n}{\tau}$. В случае переменного усиленного напряжения $n_{\text{опт}}$ — это число циклов за время, не большее времени одного полупериода сигнала.

Согласно (10) и (11), коэффициент усиления по напряжению практически не зависит от емкости нагрузки C_n в широких пределах значений внутренней емкости источника сигнала C_n , т. е. имеет место согласование полных сопротивлений источника сигнала и нагрузки при высоком входном сопротивлении, определяемом в основном полным сопротивлением переменного конденсатора. Усиление сигнала по мощности будет происходить, таким образом, и за счет усиления напряжения, и за счет согласования полных сопротивлений.

Шумовые свойства. Одним из основных ограничивающих чувствительность факторов являются шумы, создаваемые самим динамическим конденсатором, а при использовании емкости перехода полупроводниковых диодов — генератором накачки [1]. В описываемом случае эти шумы так же, как и сигнал, будут усилены и отношение сигнал/шум останется неизменным, в то время как при наличии развязывающего сопротивления сигнал, как уже говорилось, делится в определенное число раз, а шумы в цепи переменного конденсатора снимаются с нее без деления (в схеме рис. 1 даже с усилением), и поэтому отношение сигнал/шум будет во столько же раз меньше, во сколько делится сигнал. Таким образом, при одинаковой шумности цепи переменных конденсаторов в предлагаемом способе имеет место увеличение чувствительности по сравнению с применяемыми способами использования переменных конденсаторов, или, применяя понятие [3] коэффициента шума, можно сказать, что описанное параметрическое усиление характеризуется меньшим коэффициентом шума.

Экспериментальная проверка усиления по напряжению. Конструктивная реализация описанного способа может быть довольно разнообразной. Проверка предлагаемого способа была осуществлена в двух вариантах. В одном варианте в качестве ключей K_1 и K_2 использовали два магнитоуправляемых контакта (контакты, запаянные в стеклянную колбочку и приводимые в действие внешним магнитным полем), в другом варианте — два полупроводниковых диода с источником напряжения смещения. В обоих вариантах использовался один и тот же динамический конденсатор. Один элемент этого конденсатора представлял собой две изолированные друг от друга неподвижные пластины. Изменение емкости между этими пластинами происходит за счет вращения в непосредственном соседстве с ними изолированного ротора из пластины. Плоскопараллельным набором из шести таких элементов удалось достигнуть значений $C_{\max} = 180 \text{ пф}$, $C_{\min} = 8 - 9 \text{ пф}$. Сопротивление изоляции между пластинами статора было не ниже 10^{12} ом . Динамический конденсатор помещался в плексигласовый пенал, а последний — в электростатический экран. Необходимо отметить, что, несмотря на такой грубый способ изготовления динамического конденсатора

(отсутствие вакуумирования, низкая чистота материалов, плохая герметизация и т. д.), предлагаемый способ показал шумность порядка единиц милливольт в рабочем диапазоне частот. Необходимая синхронность срабатывания контактов осуществлялась экранировкой контактов от магнитного поля неподвижных постоянных магнетиков с помощью отдельной крыльчатки из железа, укрепленной на одном валу с ротором динамического конденсатора. Такой привод обеспечивал сравнительно

малую шумность срабатывания контактов.

На рис. 3 представлены экспериментально полученные графики зависимости коэффициента усиления напряжения от частоты изменения емкости f_H и частоты сигнала f_C .

В случае больших частот накачки или больших емкостей, как в нашем эксперименте, вместо ключей с высоким сопротивлением в разомкнутом состоянии можно использовать полупроводниковые диоды.

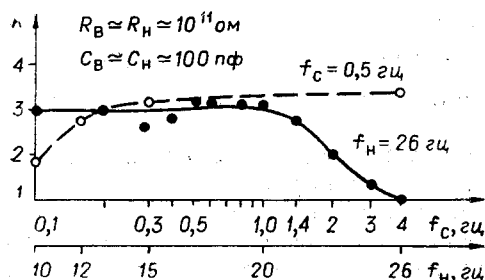


Рис. 3.

Но при этом для одинакового усиления обоих полупериодов сигнала необходимо сигнал преобразовать в однополярный. С этой целью последовательно с источником сигнала включалась электрическая батарея. Каждый контакт был заменен одним диодом Д107, в результате чего получался диодный детектор по схеме асимметричного удвоителя. Сопротивления в обратном направлении при напряжении испытания 150 в составляли $3 \cdot 10^{10}$ ом для одного диода и 10^{10} для другого, сопротивления в прямом направлении примерно 1,3 ком для обоих диодов. Результаты, показанные с использованием диодов, при всех прочих равных условиях приблизительно такие же, что и результаты с магнитоуправляемыми контактами.

Можно надеяться, что этот способ параметрического усиления будет полезным в области электрометрических измерений, измерений низкочастотных электрических полей в воздухе и во всех тех случаях, когда требуется низкочастотный усилитель с высокоомным входом, малым уровнем шумов и практически неограниченным (при использовании динамических конденсаторов) динамическим диапазоном.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Д. Авербух. Нерезонансное параметрическое усиление низкой частоты на емкости сплавных $p-n$ переходов.— Радиотехника, 1966, т. 21, № 6.
2. A. G. van Nie, J. J. Zaalberg van Zelst. A Vibrating capacitor driven by a high-frequency electric field.— Philips technical review, 1963/64, v. 25, № 4.
3. В. С. Эткин, Е. М. Гершензон. Параметрические системы на полупроводниковых диодах. М., «Советское радио», 1964.

Поступила в редакцию
20 ноября 1968 г.