

УДК 621.317

Реальная RC - цепь при воздействии прямоугольного импульса

Чубурков Александр Евгеньевич

chuburkov2015@mail.ru

Мельниченко Никита Александрович

nekroshved@mail.ru

Серов Илья Евгеньевич

serovie@student.bmstu.ru

Кузнецов Вадим Вадимович

vadim.kuznetsov@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Рассмотрена реальная цепь RC, состоящая из резистора и конденсатора, а также влияние выходного сопротивления источника импульсов и паразитных емкостей на ее поведение. Изучение электрических цепей является важной задачей в электротехнике и радиофизике, особенно реакций элементов на прямоугольные импульсы. Приведены эпюры напряжения для цепей при воздействии n-р входного импульса, и оценена длительность фронта в интегрирующей и дифференцирующей цепях. В исследовании делается вывод о том, что понимание того, как цепь реагирует на изменения внешних условий, помогает в проектировании более эффективных и надежных электронных устройств.

Ключевые слова: интегрирующая цепь, дифференцирующая цепь, резистор, конденсатор, импульс, четырехполюсник

Изучение электрических цепей является одной из ключевых задач в области электротехники и радиофизики. Особое внимание уделяется реакциям различных элементов цепи на внешние воздействия, в частности на прямоугольные импульсы, которые представляют собой распространенный тип сигналов в современном электрооборудовании [1]. В данной статье сосредоточено внимание на реальной цепи, состоящей из резистора (R) и конденсатора (C), что позволяет изучить динамику ее реакции на прямоугольный импульс.

Прямоугольные импульсы находят широкое применение в цифровой электронике, в системах управления и в обработке сигналов, поэтому понимание поведения RC-цепи в ответ на такие сигналы имеет ключевое значение. [2].

В реальной RC-цепи в большинстве случаев следует учитывать не только резистор R и конденсатор C, являющиеся основными элементами цепи и представленными на рис. 1, но также выходное сопротивление источника импульсов $R_{\text{вых}}$ и паразитные емкости, присутствующие в схеме.

В реальной цепи приходится учитывать влияние как выходного сопротивления $R_{\text{вых}}$, так и паразитных емкостей $C_{\text{п}}$. Паразитные емкости становятся значимыми преимущественно во время быстрых процессов, связанных с образованием фронта и среза выходного импульса, когда большая емкость C практически ведет себя как нулевое сопротивление. Поэтому паразитную емкость $C_{\text{п}}$ можно рассматривать как сосредоточенную и включенную параллельно к резистору R (рис. 2, а) [3].

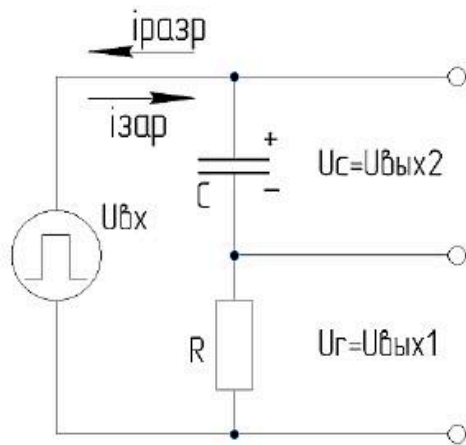


Рис. 1. Схема линейной цепи RC при воздействии прямоугольного входного импульса

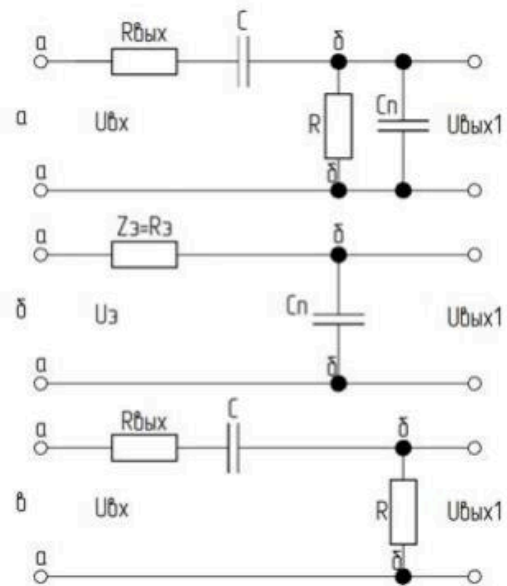


Рис. 2. Эквивалентные схемы реальной цепи RC с дифференцирующим выходом:
 a — в общем случае; b — для периода формирования фронта и среза; $в$ — для периода формирования вершины

В общем случае паразитная емкость равна

$$C_{\Pi} = C_{\text{вх}} + C_{\text{вых}} + C_{\text{м}},$$

где $C_{\text{вх}}$ — входная емкость нагрузки; $C_{\text{вых}}$ — выходная емкость генератора; $C_{\text{м}}$ — емкость монтажа.

Эквивалентное сопротивление Z_0 определяется методом короткого замыкания и представляет собой сопротивление, рассчитанное (или измеренное) в точках $бб$ в сторону четырехполюсника при замкнутых накоротко входных клеммах $аа$. Эквивалентное напряжение U_0 является выходным напряжением на клеммах $бб$ при отсутствии нагрузки (холостой ход) [4].

Эквивалентное сопротивление Z_0 вычисляется с использованием метода короткого замыкания и представляет собой сопротивление, определенное (или измеренное) в точках $бб$, когда входные клеммы $аа$ замкнуты накоротко. Эквивалентное напряжение U_0 соответствует выходному напряжению на клеммах $бб$ при отсутствии нагрузки, т. е. в режиме холостого хода [5].

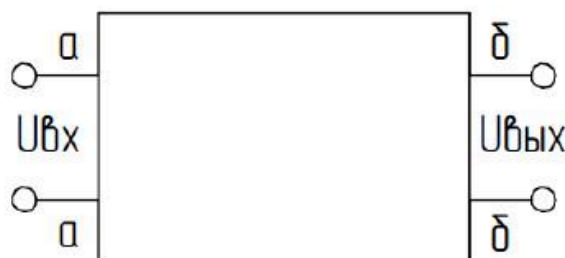


Рис. 3. Четырехполюсник

Пересчитав сопротивление R с использованием теоремы об эквивалентном генераторе, получаем цепь, представленную на рис. 2, б. Полученная схема позволяет сделать вывод, что длительность фронта выходного импульса определяется постоянной времени зарядки паразитной емкости [5].

При медленных изменениях напряжения на емкости C_{Π} (вершина импульса) ток $i_c = C_{\Pi} \frac{du_{\text{ВЫХ2}}}{dt}$, идущий на паразитную емкость, остается малым. Следовательно, в этот момент емкость C_{Π} можно не учитывать, применяя эквивалентную схему, изображенную на рис. 2, в, которая представляет собой дифференцирующую или интегрирующую цепь. Для цепей этого типа актуальны эпюры, показанные пунктиром на рис. 4, а и б соответственно. При этом надо принять, что амплитуда выходного напряжения будет равна $U_{\text{ВХ}} \frac{R}{R+R_{\text{ВЫХ}}}$, а постоянная времени $\tau = (R + R_{\text{ВЫХ}})C$.

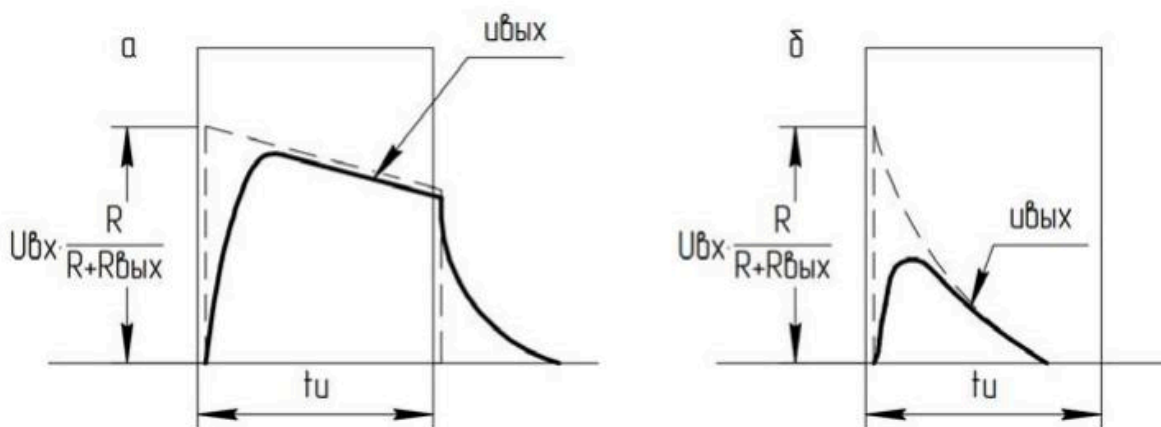


Рис. 4. Эпюры напряжений для реальной интегрирующей (а) и дифференцирующей (б) цепей при воздействии прямоугольного входного импульса

С учетом C_{Π} получаются эпюры $U_{\text{ВЫХ}}$ изображенные на рис. 4 сплошными линиями [5]. Покажем, как приближенно оценить длительность фронта в интегрирующей и дифференцирующей цепях и длительность среза в переходной цепи. Для этого напомним, что во время протекания интересующих нас быстрых процессов пластины конденсатора C считаем замкнутыми накоротко, и тогда, используя теорему об эквивалентном генераторе, получаем схему, изображенную на рис. 2, б [5].

В этой схеме

$$R_3 = \frac{RR_{\text{ВЫХ}}}{R + R_{\text{ВЫХ}}}$$

и начальное значение u_3

$$U_{3 \text{ макс}} = U_{\text{ВХ}} \frac{R}{R+R_{\text{ВЫХ}}}.$$

Для переходной цепи u_3 с полным основанием можно рассматривать прямоугольный импульс, так как за время действия фронта $t_{\phi} = 2,3R_3C_{\Pi}$ напряжение на вершине успеет снизиться весьма незначительно поскольку $R \gg R_3$, $C \gg C_{\Pi}$ и, следовательно, $\tau \gg \tau_{\Pi}$ [5].

В дифференцирующей цепи обычно принимают

$$C \gg C_{\min} = (3 \div 4)C_{\Pi},$$

а величину R выбирают такой, чтобы получить соответствующую длительность выходного импульса, определяемую по формуле

$$t'_и = 2,3\tau = 2,3RC.$$

Минимальная постоянная времени цепи $\tau_{\min} = R_{\min}C_{\min}$ выбирается исходя из указанных обстоятельств [5].

Если принять условие $C \gg C_{\min} = (3 \div 4)C_{\Pi}$, положив $C = 4C_{\Pi}$, и учесть, что при любых обстоятельствах $R_3 < \frac{R}{2}$, то можно записать: $\tau_{\Pi} = R_3C_{\Pi} < \frac{\tau}{8}$.

Примем для определенности $\tau_{\Pi} = \frac{\tau}{10}$ и предположим, что во время формирования фронта в дифференцирующей цепи u_3 , также как и в предыдущем случае, является прямоугольным импульсом амплитуды u_3 . Тогда

$$t_{\phi} = 2,3\tau_{\Pi} = \frac{2,3}{10}\tau \cong 0,25\tau.$$

За это время, согласно соотношению $u_{\text{вых1}} = u_R = U_{\text{вх}}e^{-\frac{t}{\tau}} = U_{\text{вых1макс}}e^{-\frac{t}{\tau}}$, напряжение u_3 дифференцирующей цепи упало бы до величины

$$u_{3\ t=t_{\phi}} = U_3e^{-\frac{t_{\phi}}{\tau}} = U_3e^{-0,25} = 0,75U_3.$$

Такой спад, с точки зрения приблизительного определения длительности фронта, может рассматриваться как незначительный. Следовательно, для дифференцирующей цепи длительность фронта можно вычислить по формулам $t_{\phi} = t_{\text{ср}} = \tau \ln 2 = 0,7\tau$ и $t_{\phi} = t_{\text{ср}} \cong 0,7\tau$, если в последних τ заменить на τ_{Π} [5].

Изучение поведения реальной RC-цепи при воздействии прямоугольного импульса предоставляет важную информацию для профессионалов в области электроники и связанных технологий. Понимание того, как цепь реагирует на изменения внешних условий, помогает в проектировании более эффективных и надежных электронных устройств. Учитывая все факторы, важно не только применять теоретические модели, но и проводить экспериментальные исследования, чтобы проверить полученные результаты на практике. Это знание открывает новые горизонты в проектировании, оптимизации и разработке современных электронных систем.

Литература

- [1] Salman E. Switching noise and timing characteristics in nanoscale integrated circuits. Degree Dr. (Phil.), 2011, pp. 135–140.
- [2] Муромцев Д.Ю., Тюрин И.В., Белоусов О.А. *Конструирование устройств электронных средств*. Ростов-на-Дону, Феникс, 2013, 540 с.
- [3] Уваров А.С. PCAD-2002 и SPECCTRA. *Проектирование печатных плат*. Москва, СОЛОН-Пресс, 2003, 524 с.
- [4] Пасынков В.В., Сорокин В.С. *Материалы электронной техники*. Санкт-Петербург, Лань, 2002, 481 с.
- [5] Регельсон Л.М., Кузнецов А.В., Пятибратов А.П. *Импульсная техника*. Москва, МГУ, 1967, 479 с.

A real RC circuit when subjected to a rectangular pulse.

Chuburkov A.E.	chuburkov2015@mail.ru
Melnichenko N.AL.	nekroshved@mail.ru
Serov I.E.	serovie@student.bmstu.ru
Kuznetsov V.V.	vadim.kuznetsov@bmstu.ru

BMSTU, Moscow, Russia

This paper deals with a real RC circuit consisting of a resistor and a capacitor and the influence of the output resistance of the pulse source and parasitic capacitances on its behaviour. The study of electrical circuits is an important task in electrical engineering and radiophysics, especially the response of elements to rectangular pulses. In the paper, we present voltage epuples for circuits when subjected to pr input pulse and estimate the edge duration in integrating and differentiating circuits. The study concludes that understanding how a circuit responds to changes in external conditions helps in designing more efficient and reliable electronic devices.

Keywords: integrating circuit, differentiating circuit, resistor, capacitor, pulse, quadrupole