

УДК 621.3.011.732.24  
DOI: 10.18799/29495407/2025/4/104  
Шифр специальности ВАК: 2.2.9  
Научная статья



## Анализ схемотехники интегрирующих RC-цепей для применения в ЦАП на основе ШИМ

К.А. Волобуев, В.М. Москалева, И.В. Трубин, В.Г. Трубин✉

Новосибирский Государственный Технический Университет, Россия, г. Новосибирск

✉trubin@corp.nstu.ru

**Аннотация.** В научной, учебной и инженерной деятельности часто необходимо передавать аналоговый сигнал для управления различными исполнительными устройствами. Примерами таких устройств являются двигатели, клапаны, заслонки, светотехника, аудиотехника. Так как большинство современных технических систем управляются цифровыми микроконтроллерами, для получения аналогового сигнала требуются специализированные устройства – модули цифро-аналогового преобразования. Существуют различные схемотехники для преобразования цифрового сигнала в аналоговый. Один из видов цифро-аналоговых преобразователей основывается на использовании широтно-импульсной модуляции и фильтра нижних частот, который может быть представлен в виде интегрирующей RC-цепи. В данной статье рассматривается принцип работы цифро-аналогового преобразователя на основе интегрирующих RC-цепей. Исследуется влияние параметров входного сигнала и различных комбинаций компонентов на выходной сигнал фильтра нижних частот. Рассматриваются особенности последовательного включения нескольких звеньев RC. Статья будет полезна к ознакомлению студентам, магистрам, инженерам и аспирантам, желающим изучить работу цифро-аналогового преобразователя на основе интегрирующей RC-цепи.

**Ключевые слова:** интегрирующая RC-цепь, широтно-импульсная модуляция, цифро-аналоговый преобразователь, амплитудно-частотная характеристика, постоянная времени, форма импульса, фильтр нижних частот

**Благодарности:** Работа выполнена в рамках Соглашения о предоставлении гранта в форме субсидий из областного бюджета Новосибирской области в соответствии с п. 4 статьи 78.1 Бюджетного кодекса РФ от 26.10.2023 № 0000005406995998235121722/№ МЛ-3, заключенного между Министерством науки и инновационной политики Новосибирской области и НГТУ (проект Сиббионоц).

**Для цитирования:** Анализ схемотехники интегрирующих RC-цепей для применения в ЦАП на основе ШИМ / К.А. Волобуев, В.М. Москалева, И.В. Трубин, В.Г. Трубин // Известия Томского политехнического университета. Промышленная кибернетика. – 2025. – Т. 3. – № 4. – С. 8–20. DOI: 10.18799/29495407/2025/4/104

UDC 621.3.011.732.24  
DOI: 10.18799/29495407/2025/4/104  
Scientific paper



## Circuit analysis of RC integration circuits for use in PWM-based DACs

K.A. Volobuev, V.M. Moskaleva, I.V. Trubin, V.G. Trubin✉

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

✉trubin@corp.nstu.ru

**Abstract.** In scientific, educational, and engineering settings, it is often necessary to transmit analog signals to control various actuators. Examples of such devices include motors, valves, dampers, lighting, and audio equipment. Since most modern technical systems are controlled by digital microcontrollers, specialized devices – digital-to-analog conversion modules are required to generate an analog signal. Various circuit designs exist for converting digital signals to analog. One type of digital-to-analog converter uses pulse width modulation and a low-pass filter, which can be represented as an integrating RC circuit. This article examines the

operating principle of a digital-to-analog converter based on integrating RC circuits. The paper examines the impact of input signal parameters and various component combinations on the output signal of a low-pass filter and discusses the specifics of connecting multiple RC sections in series. This article will be useful for undergraduate, graduate, engineering, and postgraduate students interested in studying the operation of digital-to-analog converters based on integrating RC circuits.

**Keywords:** RC integration circuit, pulse width modulation, digital-to-analog converter, frequency response, time constant, pulse shape, low-pass filter

**Acknowledgements:** The work was carried out within the framework of the agreement on providing a grant in the form of subsidies from the regional budget of Novosibirsk region in accordance with paragraph 4 of Article 78.1 of the Budget Code of the Russian Federation dated October 26, 2023 no. 0000005406995998235121722/no. ML-3, signed between the Ministry of Science and Innovation Policy of Novosibirsk oblast and Novosibirsk State Technical University (Sibbionots project).

**For citation:** Volobuev K.A., Moskaleva V.M., Trubin I.V., Trubin V.G. Circuit analysis of RC integration circuits for use in PWM-based DACs. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Industrial Cybernetics*, 2025, vol. 3, no. 4, pp. 8–20. DOI: 10.18799/29495407/2025/4/104

## Введение

Большинство современных технических систем управляются цифровыми контроллерами. Эти устройства оперируют дискретными сигналами. Однако исполнительные устройства, такие как электродвигатели, нагревательные элементы, клапаны, заслонки и многое другое, нередко требуют для своего управления не просто включения/выключения, а плавной регулировки. Для этого используются аналоговые сигналы, которые позволяют изменять управляющее напряжения или ток в определённом диапазоне. Однако не у каждого современного цифрового контроллера есть достаточное количество встроенных аналоговых выходов. Более того, многие бюджетные или специализированные контроллеры их вовсе не имеют. В то время как цифровых портов ввода-вывода может быть в избытке. Одним из наиболее доступных, простых и экономичных способов получения аналогового сигнала из цифрового является использование *RC-цепи*, на вход которой подаётся широтно-импульсная модуляция (ШИМ, англ. *pulse width modulation* – PWM). В данной статье будут рассмотрены особенности, которые возникают при проектировании цифро-

аналогового преобразователя (ЦАП, англ. *digital-to-analog converter* – DAC) на основе RC-цепи.

## Классификация схем ЦАП

Цифро-аналоговый преобразователь предназначен для преобразования числа (обычно представленного в виде двоичного кода) в напряжение или ток, пропорциональные значению цифрового кода. Более подробное описание аналогового и цифрового сигналов приведены в статье [1].

Схемотехника цифро-аналоговых преобразователей весьма разнообразна [2]. На рис. 1 представлена упрощённая классификационная схема ЦАП по схемотехническим признакам.

В рамках данной статьи рассмотрен принцип работы цифро-аналогового преобразователя на основе ШИМ и интегрирующей RC-цепи. Данная схемотехника ЦАП применяется в промышленности благодаря своей простоте, высокой надёжности и низкой стоимости. Минусом цифро-аналоговых преобразователей данного типа является относительная сложность обеспечения высокого разрешения, поскольку для этого требуется очень высокая тактовая частота ШИМ.

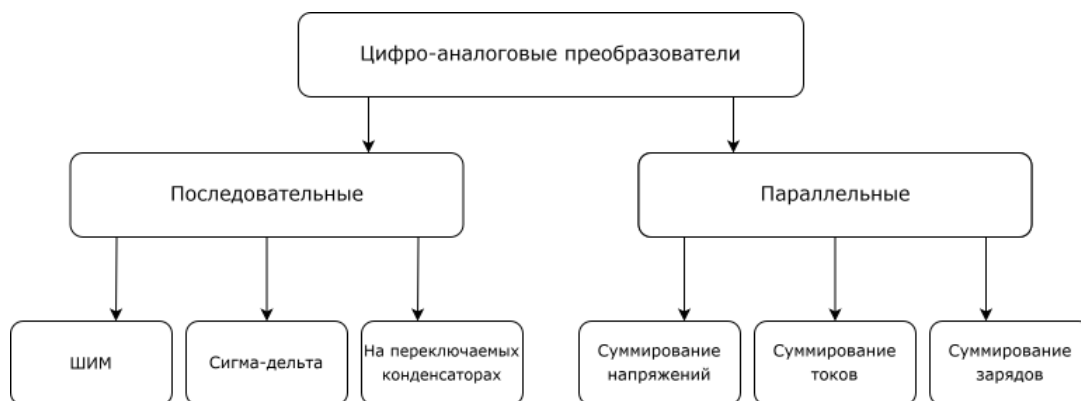


Рис. 1. Упрощённая классификация ЦАП

Fig. 1. DAC simplified classification

### Конденсатор в цепи переменного тока

Преобразование ШИМ-сигнала в аналоговый возможно благодаря особенностям работы конденсатора в цепи переменного тока. Напомним, что между обкладками конденсатора находится диэлектрик. Исходя из этого, ток через сам конденсатор протекать не может.

Рассмотрим ситуацию, подключения конденсатора параллельно батарейке. Пока разность потенциалов между обкладками конденсатора меньше, чем напряжение источника питания, по цепи от источника до конденсатора будет течь ток. Как только напряжение на конденсаторе станет равно напряжению батарейки, ток от батарейки до конденсатора перестанет течь.

Теперь рассмотрим подключение конденсатора к источнику переменного тока. За счёт постоянной смены направления протекания тока в цепи конденсатор будет постоянно заряжаться (ток течёт от источника к конденсатору) и разряжаться (ток течёт от конденсатора к источнику). Исходя из процесса постоянной зарядки и разрядки можно сделать вывод, что, даже не протекая через диэлектрик конденсатора, ток в цепи будет поддерживаться только за счёт постоянной смены его направления. Более подробно описанные выше процессы объясняются в статье [3].

### Амплитудно-частотная характеристика интегрирующей RC-цепи

Схема интегрирующей RC-цепи представлена на рис. 2. Работу приведённой цепи можно представить как резистивный делитель напряжения, только конденсатор – это элемент, сопротивление которого зависит от частоты согласно формуле (1).

$$X_c = \frac{1}{2\pi FC}, \quad (1)$$

где  $X_c$  – реактивное сопротивление конденсатора, Ом;  $\pi$  – постоянная, приблизительно равная 3,14;  $F$  – частота, Гц;  $C$  – ёмкость конденсатора, Ф.

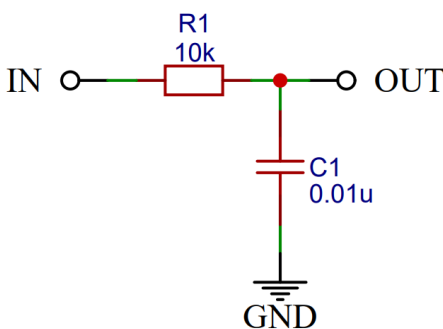


Рис. 2. Интегрирующая RC-цепь

Fig. 2. Integrating RC circuit

Согласно формуле (1), при частоте сигнала, равной нулю (постоянное напряжение), сопротивление конденсатора стремится к бесконечности. В таком случае напряжение на конденсаторе будет постепенно увеличиваться, пока не достигнет входного напряжения. График напряжения на выходе будет иметь вид, представленный на рис. 3. При отключении входного сигнала конденсатор начнёт разряжаться за счёт подключённой к нему нагрузки.

При увеличении частоты реактивное сопротивление конденсатора уменьшается. Если рассматривать RC-цепь как делитель напряжения, то вместе с этим уменьшается и напряжение на выходе. Причём не важно, какая форма будет у сигнала, ШИМ, синусоида, треугольный. Справедливость данного утверждения можно наблюдать при просмотре осциллограмм на выходе RC-цепи для переменного сигнала различной частоты, симметричного относительно нуля. На рис. 4 представлены осциллограммы, снятые с выхода RC-цепи при входном синусоидальном сигнале амплитудой 5 В для частоты 100 Гц (жёлтый), 500 Гц (синий) и 1 кГц (красный). Деление по вертикали 1 В/клетка, по горизонтали 2 мс/клетка.

На рис. 5 представлены осциллограммы, снятые с выхода RC-цепи при входном синусоидальном сигнале амплитудой 5 В с постоянной составляющей 5 В (среднее значение переменного сигнала смещено относительно нуля). Таким образом, входной синусоидальный сигнал (на графиках не показан) имеет диапазон 0–10 В. При этом значение напряжения на выходе RC-цепи будет стремиться к значению постоянной составляющей. Чем больше частота входного сигнала, тем меньше будет амплитуда переменной составляющей на выходе.

Исходя из графиков, представленных на рис. 3–5, можно сделать вывод, что частотная зависимость конденсатора влияет только на переменную составляющую сигнала, оставляя постоянную составляющую неизменной.

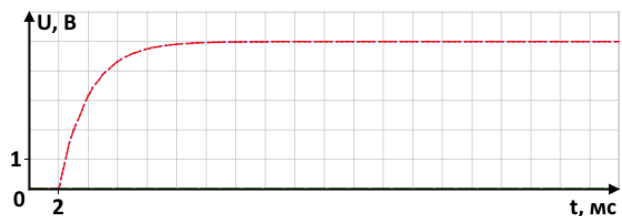


Рис. 3. Сигнал на выходе RC-цепи при постоянном напряжении на входе

Fig. 3. Signal at the output of the RC circuit with a constant voltage at the input

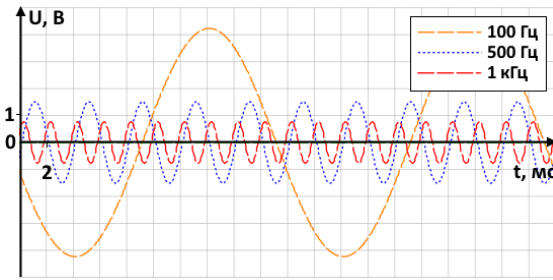


Рис. 4. Сигнал на выходе RC-цепи при переменном напряжении на входе

Fig. 4. Signal at the output of the RC circuit with an alternating voltage at the input

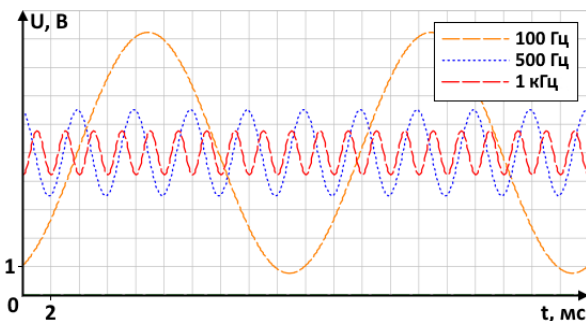


Рис. 5. Сигнал на выходе RC-цепи при переменном напряжении на входе с постоянной составляющей

Fig. 5. Signal at the output of the RC circuit with an alternating voltage at the input with a constant component

На рис. 6 приведена амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) RC-цепи для сопротивления 10 кОм и ёмкости 0,01 мкФ. График АЧХ показывает, как сильно уменьшится напряжение на выходе RC-цепи при определённой частоте. Для разработки ЦАП примем, что чем больше ослабление на частоте входного сигнала, тем меньше будут пульсации напряжения на выходе. Расширенное описание частотных характеристик RC-цепей приведено в [4].

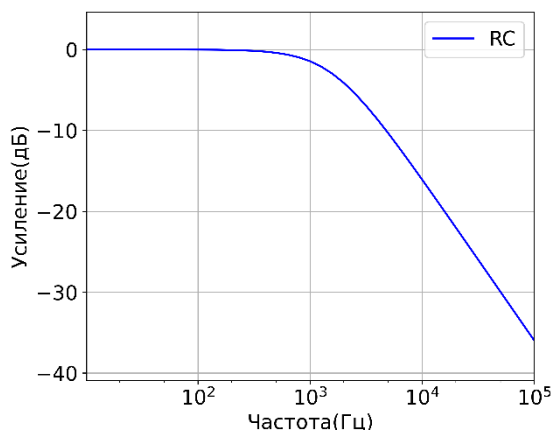


Рис. 6. График АЧХ для RC-цепи

Fig. 6. Frequency response graph for RC circuit

Из графика на рис. 6. также можно заметить, что АЧХ интегрирующей RC-цепи похожа на АЧХ фильтра нижних частот (ФНЧ). Одним из основных параметров фильтра является частота среза – частота, на которой амплитуда выходного сигнала принимает значение –3 децибела (дБ).

Децибел – это относительная величина, которая показывает отношение двух однородных величин в логарифмическом масштабе. Использование децибел и логарифмической шкалы позволяет рассмотреть сигнал в более широком диапазоне значений по сравнению с линейной шкалой.

Для напряжения и тока расчёт коэффициента усиления (амплитуды) выполняется по формулам (2), (3).

$$K_{U\text{дБ}} = 20 \lg \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}}, \quad (2)$$

$$K_{I\text{дБ}} = 20 \lg \frac{I_{\text{ВЫХ}}}{I_{\text{ВХ}}}. \quad (3)$$

Для мощности используется формула (4)

$$K_{P\text{дБ}} = 10 \lg \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{ВХ}}}. \quad (4)$$

Для расчёта частоты среза RC-цепи можно воспользоваться формулой (5)

$$f = \frac{1}{2\pi RC}. \quad (5)$$

АЧХ идеального ФНЧ имеет прямоугольную форму. Такой фильтр полностью устраняет все частоты входного сигнала, превышающие частоту среза, и пропускает без изменений все частоты, которые ниже этой частоты. На практике реализовать идеальный фильтр невозможно, поэтому для проведения качественного цифро-аналогового преобразования необходимо, чтобы частота среза фильтра была много меньше, чем частота ШИМ. Однако слишком низкая частота среза означает большое время переходного процесса, поэтому требуется соблюдение компромисса между временем переходного процесса и уровнем ослабления сигнала.

### Постоянная времени интегрирующей RC-цепи

При подаче на вход интегрирующей RC-цепи прямоугольного импульса напряжение на выходе будет возрастать и убывать согласно графикам, приведённым на рис. 7. Более подробно переходные процессы в RC-цепях рассмотрены в [5].

Основной характеристикой RC-цепей является постоянная времени цепи  $\tau = RC$ . За время  $\tau$  конденсатор заряжается от 0 до 63 % от входного напряжения или разряжается от 100 до 37 %. Вычислить напряжение, которое установится на выходе RC-цепи спустя заданное количество времени от начала зарядки, можно по формуле (6)

$$U_{\text{ВЫХЗ}} = U_{\text{ВХ}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right). \quad (6)$$

Вычислить напряжение, которое установится на выходе  $RC$ -цепи спустя заданное количество времени от начала разрядки можно по формуле (7)

$$U_{\text{выхP}} = U_{\text{вх}} \cdot \left( e^{-\frac{t}{RC}} \right). \quad (7)$$

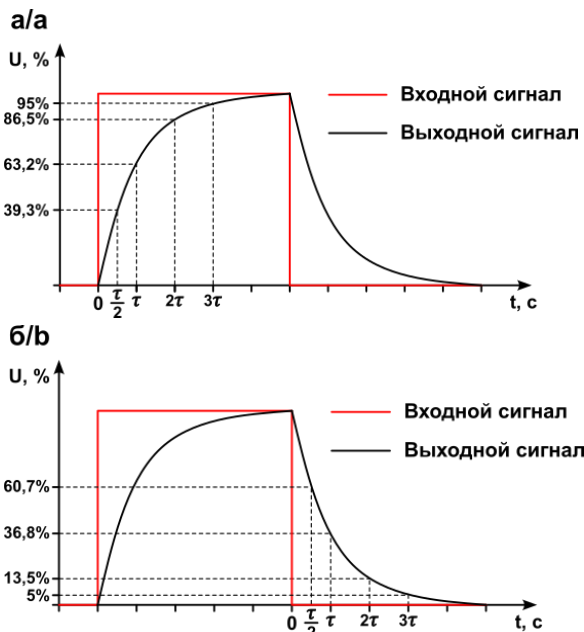


Рис. 7. График на выходе интегрирующей  $RC$ -цепи: (а) график зарядки; (б) график разрядки

Fig. 7. Output graph of the integrating  $RC$  circuit: (a) charging graph; (b) discharging graph

В табл. 1 приведены часто используемые значения  $\tau$  и соответствующие им амплитуды напряжения при зарядке и разрядке  $RC$ -цепи, выраженные в процентах.

Таблица 1. Напряжения на выходе  $RC$ -цепи

Table 1. Voltages at the output of the  $RC$  circuit

Время, с Time, s	Заряд/Charge	Разряд/Discharge
	%	
$\tau/2$	39,3	60,7
$\tau$	63,2	36,8
$2\tau$	86,5	13,5
$3\tau$	95	5
$5\tau$	99,3	0,7
$7\tau$	99,9	0,1

Жёлтым цветом на рис. 8 отображён одиночный входной импульс. Зелёным цветом приведена осциллограмма напряжения на выходе интегрирующей цепи при длительности входного импульса  $t_{\text{и}}$  много больше постоянной времени цепи  $\tau$ . Красным цветом приведена осциллограмма для  $t_{\text{и}} = \tau$ . Синим

цветом приведён выходной сигнал для  $t_{\text{и}}$  много меньше  $\tau$ .

При значениях  $t_{\text{и}}$  значительно больших, чем  $\tau$ , сигнал на выходе будет стремиться повторить форму входного сигнала. При значениях  $t_{\text{и}}$  значительно меньших, чем  $\tau$ , выходной сигнал будет приблизительно равен интегралу входного сигнала.

Для качественного выполнения процесса интегрирования постоянная времени должна быть много больше времени импульса ( $t_{\text{и}} \ll \tau$ ).

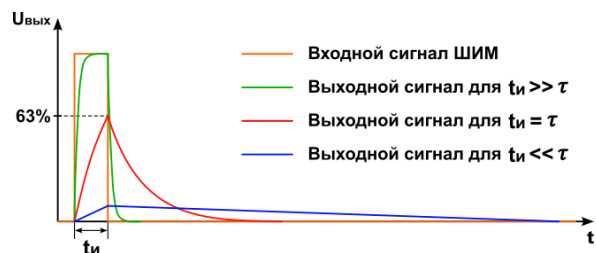


Рис. 8. Графики выходного сигнала  $RC$ -цепи с разным значением  $\tau$

Fig. 8. Graphs of the output signal of an  $RC$  circuit with different values of  $\tau$

### Описание принципа преобразования

Преобразование ШИМ-сигнала в аналоговый происходит с помощью фильтра нижних частот, который «усредняет» значение напряжения на выходе. Фильтры нижних частот можно разделить по схемотехнике на активные и пассивные [6, 7]. Наиболее простым примером практической реализации ФНЧ 1-го порядка является пассивный фильтр на интегрирующей  $RC$ -цепи. Далее в качестве примера на рис. 9 рассмотрена логика работы ЦАП на основе ШИМ [8].

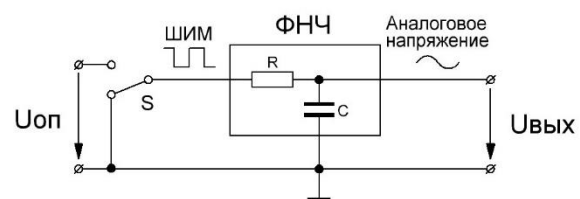


Рис. 9. Принцип работы ЦАП на основе ШИМ

Fig. 9. Operating principle of PWM-based DAC

При рассмотрении схемы предполагаем, что переключение ключа  $S$  имитирует генерацию ШИМ-сигнала. В состоянии логической единицы ключ подаёт на вход фильтра опорное напряжение  $U_{\text{оп}}$ , в состоянии логического нуля – минус питания. Опорное напряжение – это входное напряжение, которое является эталонным для определенного узла схемы. Оно формируется с помощью источника опорного



напряжения (ИОН), на выходе которого с высокой стабильностью поддерживается заданная величина напряжения. Так, на входе фильтра нижних частот формируются однополярные прямоугольные импульсы.

Если частота импульсов на входе значительно превышает частоту среза ФНЧ, то при рассмотрении осциллограммы выходного напряжения будет наблюдаться пульсирующий сигнал с постоянной составляющей, которая пропорциональна коэффициенту заполнения ШИМ. Описание коэффициента заполнения и других основных параметров ШИМ приведено в статье [1]. На рис. 10 приведены две осциллограммы выходного напряжения (синий и зелёный) от коэффициента заполнения входного сигнала (жёлтый и красный).

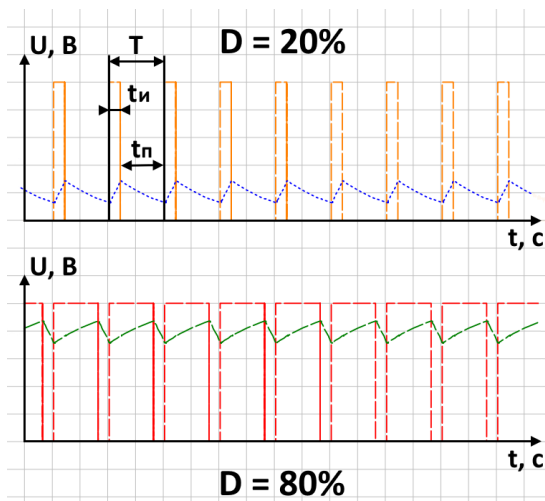


Рис. 10. Зависимость выходного напряжения от коэффициента заполнения входного ШИМ-сигнала

Fig. 10. Dependence of the output voltage on the fill factor of the input PWM signal

В зависимости от требуемой разрядности ЦАП микроконтроллер с помощью своего таймера/счётчика делит период ШИМ на равные временные промежутки. Чем больше промежутков в одном периоде сигнал находится в логической единице, тем пропорционально больше выходное напряжение. Иначе говоря, выходное напряжение пропорционально опорному напряжению  $U_{оп}$ , умноженному на коэффициент заполнения  $D$ , эту зависимость отражает выражение (8)

$$U_{вых} = U_{оп} \cdot t_n / T = U_{оп} \cdot D. \quad (8)$$

Помимо этого, коэффициент заполнения можно рассмотреть как отношение преобразуемого кода  $K$  к разрядности преобразования  $N$ . Тогда выходное напряжение преобразователя можно выразить как:

$$U_{вых} = U_{оп} \cdot K / 2^N.$$

Исходя из приведённых соотношений, ЦАП на основе ШИМ обеспечивает высокую линейность преобразования, так как опирается на тактирование микроконтроллера. Данное схемотехническое решение не содержит прецизионных электронных компонентов и требует только точного источника опорного напряжения. Основной недостаток данного метода преобразования – относительно низкое быстродействие. Причиной низкого быстродействия является необходимость большого временного интервала для преобразования. Так, для получения  $N$ -разрядного ЦАП необходимо  $2^N$  тактов таймера микроконтроллера. Помимо этого, быстродействие данного типа ЦАП ограничивается и характеристиками ФНЧ.

### Влияние частоты ШИМ-сигнала на выход RC-цепи

Время установления выходного сигнала и величина пульсаций в статическом режиме на выходе RC-цепи определяются не только параметрами RC-цепи. Они зависят также от частоты входного сигнала. На рис. 11 приведён график сравнения сигналов на выходе RC-цепи с ёмкостью конденсатора 0,1 мкФ и сопротивлением резистора 10 кОм при коэффициенте заполнения 50 % и разной входной частоте ШИМ.

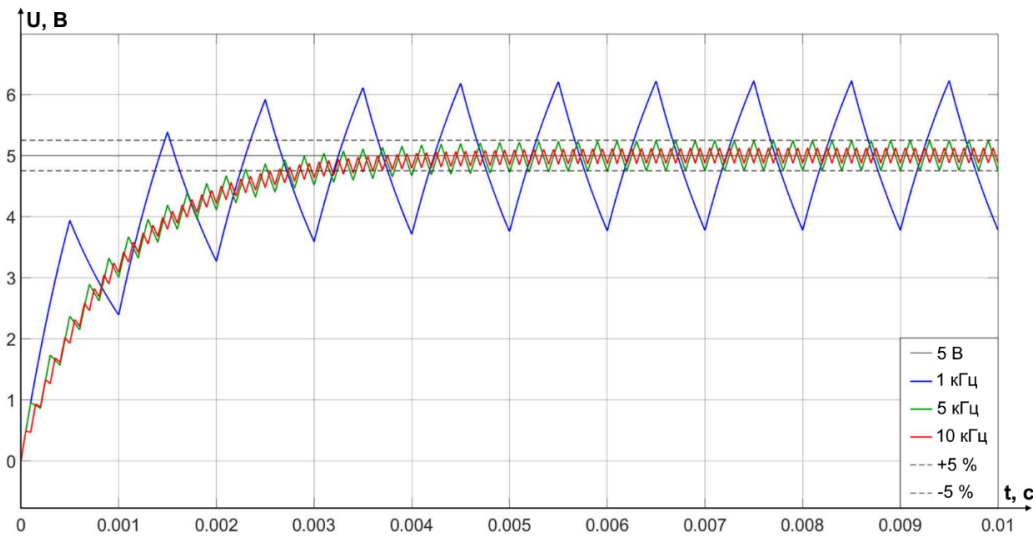
На приведённом графике можно наблюдать, что увеличение частоты ШИМ-сигнала на входе приводит к улучшению подавления пульсаций и уменьшению времени переходного процесса.

К негативным сторонам увеличения частоты ШИМ относится увеличение динамических потерь на электронных ключах. Помимо этого, важно учитывать, что максимальная частота ШИМ зависит от частоты тактирования таймера контроллера  $f_{clk}$  и от разрядности  $N$  проектируемого ЦАП. Данная зависимость представлена выражением (9)

$$f_{pwm\_max} = f_{clk} / 2^N. \quad (9)$$

Так, например, при частоте контроллера 16 МГц и желаемой разрядности ЦАП 12 бит можно обеспечить частоту ШИМ до 3,9 кГц. Исходя из этого, выбор частоты ШИМ будет определяться компромиссом двух характеристик: разрядностью (количеством уровней на выходе ЦАП) и временем преобразования.

Разрядность ЦАП определяет, на сколько промежутков разделён выходной аналоговый диапазон значений. Следовательно, чем выше разрядность, тем более точно можно установить выходное напряжение.



**Рис. 11.** Сравнение сигналов на выходе RC для разных частот ШИМ на входе  
**Fig. 11.** Comparison of RC output signals for different input PWM frequencies

Время преобразования зависит сразу от нескольких факторов – порядка ФНЧ и его частоты среза, а также частоты работы ШИМ. Частота работы ШИМ должна быть больше, чем частота среза, причём чем больше будет разница между частотой среза и частотой ШИМ, тем быстрее и эффективнее будет происходить подавление пульсаций, а следовательно, тем «чище» будет выходной сигнал.

Исходя из вышесказанного, необходимо стремиться устанавливать максимальную частоту ШИМ с учётом ограничения частоты работы микроконтроллера и требуемой разрядности ЦАП. Для достижения большей эффективности частоту среза фильтра нужно сделать как можно ниже, чтобы уменьшить пульсации на выходе. Однако с уменьшением частоты фильтра увеличивается время установления сигнала на выходе, поэтому здесь также необходим компромисс между скоростью преобразования и уровнем пульсаций.

### Влияние формы импульса

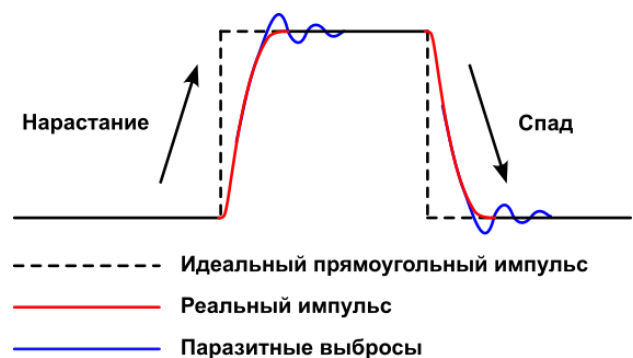
Моделирование электронных цепей происходит с помощью идеализированных процессов, поэтому значения, получаемые на практике, могут отличаться от теоретических.

Согласно ГОСТ 16465-70 [9] идеальные прямоугольные импульсы имеют вертикальные фронт и срез (их длительности стремятся к нулю). Принято считать, что длительность фронта  $t_f$  – это время изменения сигнала от 0,1 до 0,9 амплитуды импульса. Длительность среза  $t_c$  – это время изменения сигнала от 0,9 до 0,1 амплитуды импульса.

Однако при приближении реального сигнала можно заметить, что форма импульса больше напоминает трапецию [10]. Это связано с тем, что длительность фронта и длительность среза на практике

не могут быть равными нулю из-за времени, затрачиваемого на переходные процессы открытия и закрытия электронных ключей. Помимо этого, в реальном случае могут возникнуть выбросы на вершине фронта и у основания среза. Это происходит из-за паразитных ёмкостей и индуктивностей, появляющихся от элементов электрической цепи и дорожек платы. Влияние могут оказывать даже измерительные цепи осциллографа, подключенного к схеме. На рис. 12 упрощённо отражено отличие идеального импульса от реального.

В технической литературе можно встретить термины «нарастание сигнала» и «спад сигнала», которые обозначают фронт и срез соответственно. Помимо этого, в некоторых источниках могут встречаться словосочетания «передний фронт» и «задний фронт», однако такое употребление не совсем корректно, так как в общем значении термин «фронт» означает переднюю (лицевую) сторону чего-либо.



**Рис. 12.** Идеальный прямоугольный импульс и приближённая форма реального импульса  
**Fig. 12.** Ideal rectangular pulse and suitable real pulse shape

Очевидно, что микроконтроллеры и микросхемы, генерирующие импульсный сигнал, не учитывают время нарастания и время спада, в связи с этим реальная площадь импульса имеет площадь, отличающуюся от прямоугольной.

На рис. 13 приведена осциллограмма, полученная с выхода микроконтроллера *STM32F103C8T6*, на котором настроен аппаратный ШИМ с частотой 10 кГц и временем импульса 277,8 нс.

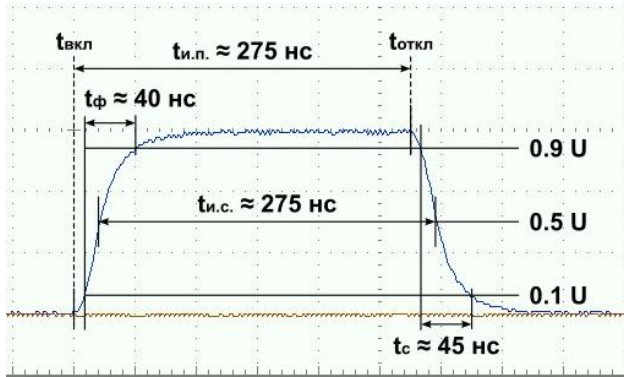


Рис. 13. Реальная осциллограмма импульса на выходе микроконтроллера

Fig. 13. Real oscillogram of the pulse at the microcontroller output

Как видно из осциллограммы на рис. 13, среднее время импульса ( $t_{и.п.}$ ) примерно совпадает с ожидаемым значением. Если смотреть за изменением формы сигнала, микроконтроллер включает импульс в момент времени ( $t_{вкл}$ ) и выключает в момент времени ( $t_{откл}$ ), между этими временными точками находится время импульса практическое ( $t_{и.п.}$ ).

При интегрировании высокочастотного сигнала ШИМ с помощью RC-цепи время нарастания и время спада могут стать критическими и вносить отклонения на выходное напряжение.

### Влияние количества звеньев RC-цепи на выходное напряжение

Одна интегрирующая RC-цепь является примером практической реализации ФНЧ 1-го порядка. Рассмотрим влияние последовательного подключения нескольких звеньев RC на выходной сигнал. Моделирование проводилось в программе *Proteus 8*. Схема модели представлена на рис. 14.

На рис. 15 отображены АЧХ RC-фильтров. Графики переходных процессов и пульсаций на выходе приведены на рис. 16, 17 соответственно.

Входные параметры для этого и следующих моделирований: сигнал ШИМ 10 кГц, коэффициент заполнения 50 %, амплитуда 3,3 В.

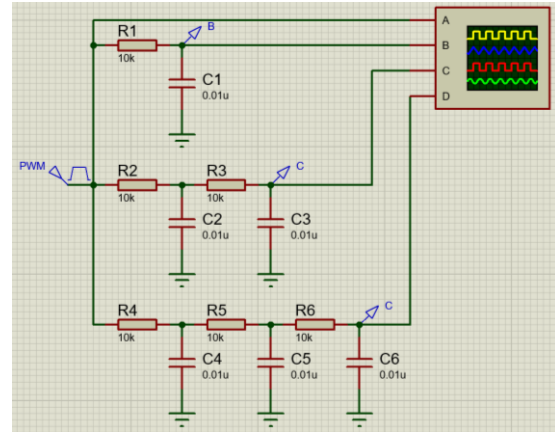


Рис. 14. Сравнение сигналов при разном количестве последовательно подключенных RC-цепей

Fig. 14. Comparison of signals with different numbers of RC circuits connected in series

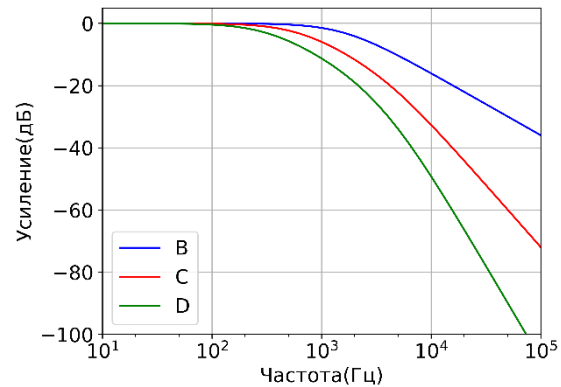


Рис. 15. АЧХ для разного количества последовательно подключенных RC-цепей

Fig. 15. Frequency response for different numbers of series-connected RC circuits

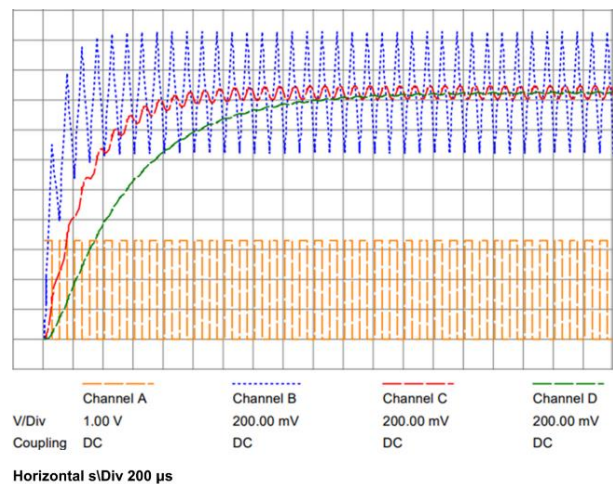
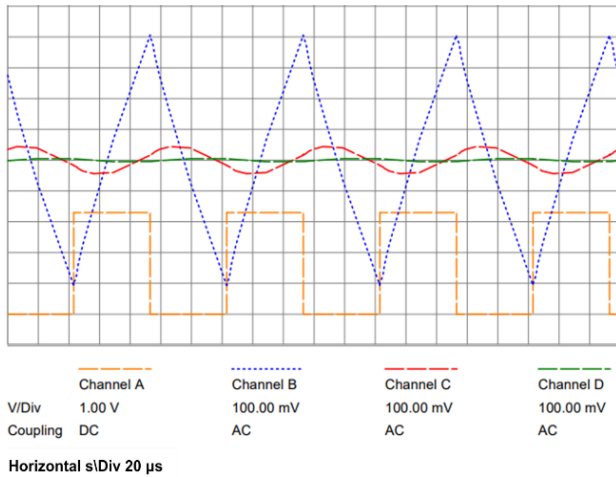


Рис. 16. Переходные процессы для разного количества последовательно подключенных RC-цепей

Fig. 16. Transient processes for different numbers of series-connected RC circuits



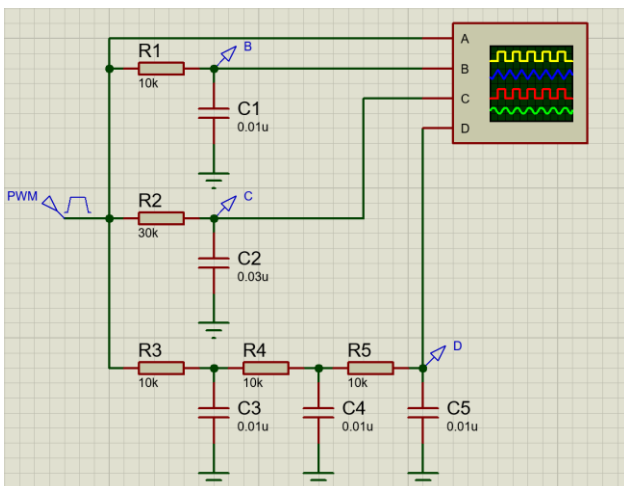


**Рис. 17.** Пульсации для разного количества последовательно подключенных RC-цепей

**Fig. 17.** Ripple for different number of series connected RC circuits

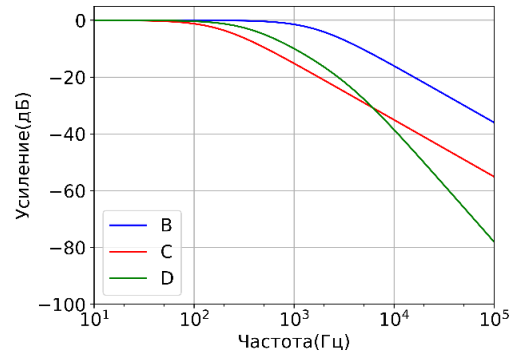
Из приведённых графиков можно заметить, что с увеличением количества звеньев значительно ослабевают выходные пульсации, но при этом увеличивается время переходного процесса.

Однако проведённое выше моделирование не совсем справедливо, ведь в нём постепенно увеличивается суммарное сопротивление резисторов и суммарная ёмкость конденсаторов. Сравним переходные процессы одной RC-цепи и трёхзвенный RC-фильтр с одинаковыми суммарными сопротивлением и ёмкостью. Моделируемые цепи представлены на рис. 18.



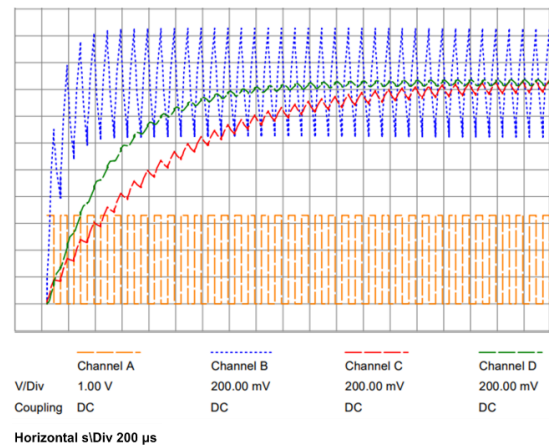
**Рис. 18.** Сравнение сигналов при разном количестве последовательно подключенных RC-цепей с компонентами разных номиналов

**Fig. 18.** Comparison of signals with different numbers of sequentially connected RC circuits with components of different ratings



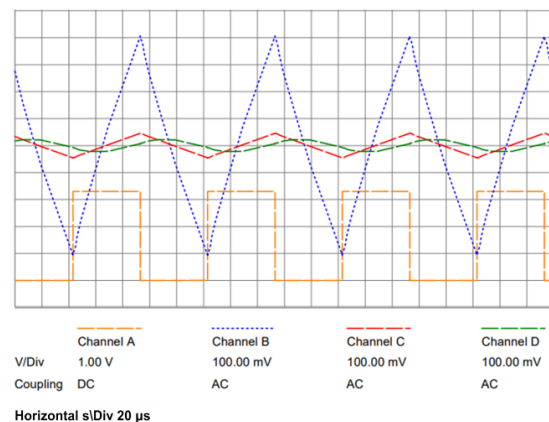
**Рис. 19.** АЧХ для разного количества последовательно подключенных RC-цепей с компонентами разных номиналов

**Fig. 19.** Frequency response for a different number of series-connected RC circuits with components of different ratings



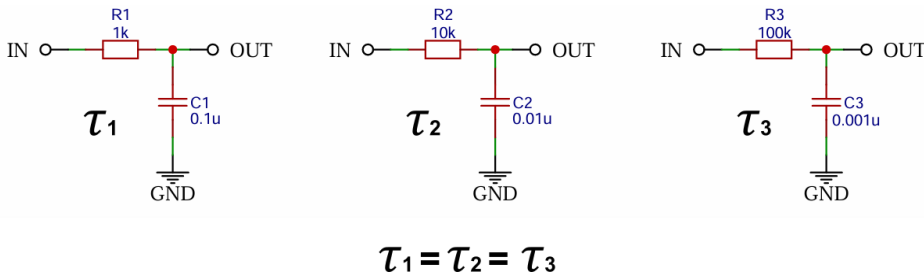
**Рис. 20.** Переходные процессы для разного количества последовательно подключенных RC-цепей с компонентами разных номиналов

**Fig. 20.** Transients for different numbers of series-connected RC circuits with components of different ratings



**Рис. 21.** Пульсации для разного количества последовательно подключенных RC-цепей с компонентами разных номиналов

**Fig. 21.** Ripples for different numbers of series-connected RC circuits with components of different ratings



**Рис. 22.** RC-цепи с разными сопротивлениями и ёмкостями, но одинаковым значением  $\tau$   
**Fig. 22.** RC circuits with different resistances and capacitances, but the same value of  $\tau$

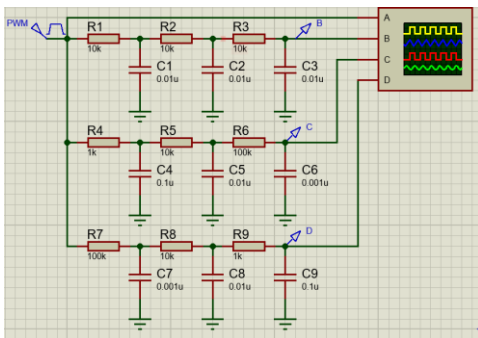
Исходя из графика АЧХ на рис. 19 и графиков, приведённых на рис. 20, 21, трёхзвенный RC-фильтр показывает лучшие результаты как по времени переходного процесса, так и по уровню пульсаций на выходе фильтра.

### Влияние параметров звеньев RC-цепи на выходное напряжение

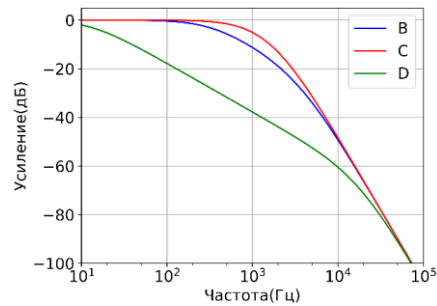
Помимо количества звеньев RC, на результат также влияют параметры RC-цепей. На рис. 22 приведены RC-цепи, которые имеют разные параметры сопротивления и ёмкости, но одинаковые постоянные времени цепи  $\tau = RC$ . Предположительно, за счёт этого их АЧХ, переходные процессы и выходные пульсации напряжения будут выглядеть одинаково.

Исходя из этих соображений, при последовательном соединении звеньев должно быть неважно, какие будут параметры сопротивлений и ёмкости, если значение постоянной времени будет одинаковым. На рис. 23 приведена схема для тестирования этого утверждения. Постоянная времени всех звеньев одинаковая, но различаются последовательности включения звеньев.

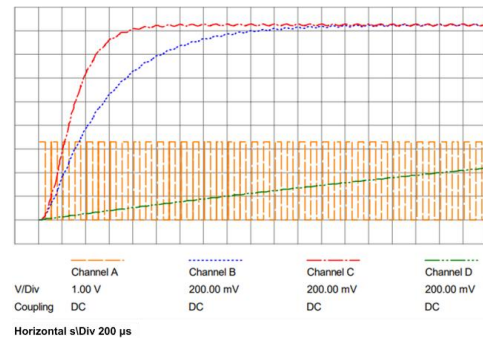
Исходя из приведённых на рис. 24 АЧХ цепей и отражённых на рис. 25, 26 графиках переходных процессов и пульсаций, можно сделать вывод, что последовательность расположения звеньев имеет важную роль. Наилучший результат получается при увеличении сопротивления каждого последующего звена и уменьшении его ёмкости.



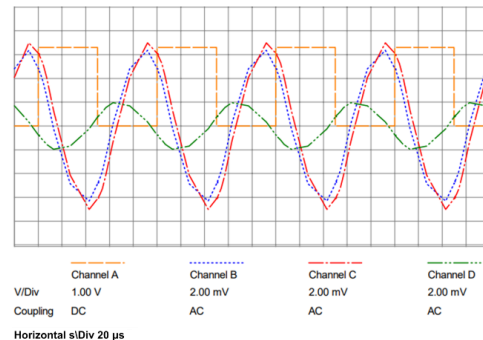
**Рис. 23.** Сравнение сигналов трёхзвенных RC-цепей с компонентами разных номиналов  
**Fig. 23.** Comparison of signals of three-link RC circuits with components of different ratings



**Рис. 24.** АЧХ трёхзвенных RC-цепей с компонентами разных номиналов  
**Fig. 24.** Frequency response of three-link RC circuits with components of different ratings



**Рис. 25.** Переходный процесс трёхзвенных RC-цепей с компонентами разных номиналов  
**Fig. 25.** Transient process of three-link RC circuits with components of different ratings



**Рис. 26.** Пульсации трёхзвенных RC-цепей с компонентами разных номиналов  
**Fig. 26.** Pulsations of three-link RC circuits with components of different ratings

## Результаты на практике

Как известно, значения, полученные при моделировании, могут отличаться от значений, полученных при проведении реальных измерений. После моделирования произведём подключение на практике. Схема подключения аналогична одной из последовательностей, представленных на рис. 23, и отображена на рис. 27.

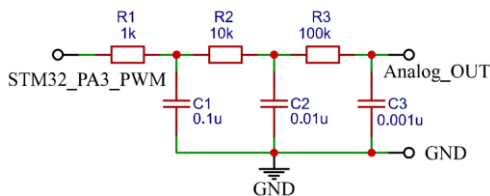


Рис. 27. Схема ЦАП  
Fig. 27. DAC scheme

Питание микроконтроллера 3,3 В, на выходе PA3 генерируется сигнал ШИМ 10 кГц, коэффициент заполнения 50 %. На рис. 28 приведена осциллограмма переходного процесса на выходе RC-цепи. На рис. 29 приведены пульсации напряжения на выходе. В обоих случаях первый щуп осциллографа (синий на графике) подключён ко входу RC-цепи, а второй щуп (оранжевый на графике) – к выходу.

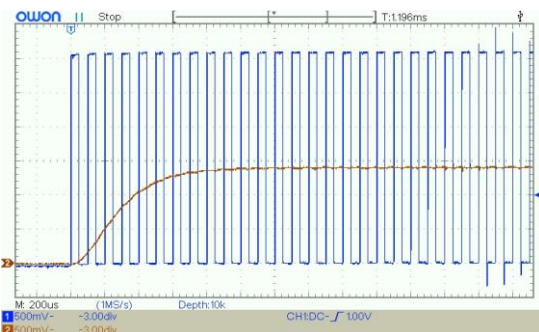


Рис. 28. Осциллограмма переходного процесса  
Fig. 28. Oscillogram of the transient process

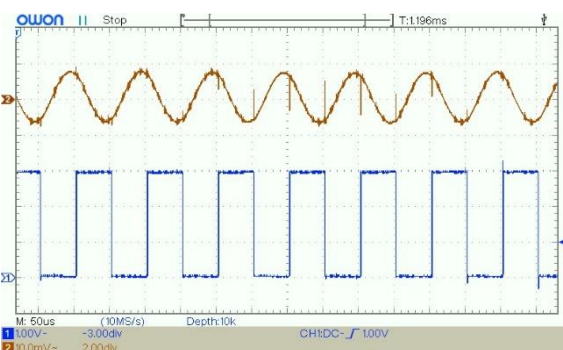


Рис. 29. Входной ШИМ-сигнал (режим DC) и выходной аналоговый сигнал (режим AC)  
Fig. 29. Input PWM signal (DC mode) and output analog signal (AC mode)

При рассмотрении выходного сигнала с помощью осциллографа можно заметить, что время установления сигнала занимает около 1 мс, а амплитуда пульсаций не превышает 8 мВ. Данные, полученные на практике, соответствуют данным, полученным при моделировании (рис. 25, 26). Ниже представлена таблица (табл. 2) соответствия коэффициента заполнения ШИМ напряжениям на выходе RC-цепи.

Таблица 2. Напряжения на выходе RC-цепи

Table 2. Voltages at the output of the RC circuit

Коэффициент заполнения ШИМ, % PWM duty cycle, %	$U_{ож}$	$U_{пр. ср}$	$U_{мод}$
	В/В		
0	0	0,0038	0,0038
10	0,33	0,3307	0,0007
20	0,66	0,6579	0,0021
30	0,99	0,9850	0,0050
40	1,32	1,3121	0,0079
50	1,65	1,6392	0,0108
60	1,98	1,9662	0,0138
70	2,31	2,2932	0,0168
80	2,64	2,6200	0,0200
90	2,97	2,9469	0,0231
100	3,3	3,2733	0,0267

Примечание:  $U_{ож}$  – ожидаемое напряжение;  $U_{пр. ср}$  – практическое среднее напряжение;  $U_{мод}$  – модуль разницы ожидаемого и практического напряжений.

Note:  $U_{ож}$  – expected voltage;  $U_{пр. ср}$  – practical average voltage;  $U_{мод}$  – modulus of the difference between expected and practical voltages.

Для получения меньших значений  $U_{мод}$  (для установления  $U_{пр. ср}$  более близко к  $U_{ож}$ ) необходимо подавать питание на микроконтроллер от внешнего источника опорного напряжения 3,3 В.

## Выводы

Установка RC-фильтра позволяет осуществить простейшее, со схемотехнической точки зрения, преобразование цифрового сигнала в аналоговый. Так, с помощью всего одного резистора и одного конденсатора появляется возможность регулировать напряжение в определённом диапазоне, изменяя коэффициент заполнения ШИМ. Недостатком данного метода ЦАП является относительно медленная скорость преобразования, обусловленная частотой ШИМ и частотой среза ФНЧ. Проектирование ЦАП на основе RC-цепи требует сбалансированного подхода при выборе между скоростью преобразования и пульсациями на выходе. При интегрировании высокочастотного сигнала ШИМ с помощью RC-цепи время нарастания и время спада могут стать критичными и вносить отклонения в выходной сигнал.

Из проведённых исследований было выявлено, что с увеличением постоянной времени цепи  $\tau$  ослабевают выходные пульсации, но увеличивается

время переходного процесса. Сравнение переходных процессов одной RC-цепи и трёхзвенного RC-фильтра с сопоставимыми суммарными сопротивлением и ёмкостью показало, что увеличение количества звеньев позволяет достичь лучших показателей

времени переходного процесса и уровня пульсаций. Помимо этого, наилучший результат получается при увеличении сопротивления каждого последующего звена и уменьшении его ёмкости в одинаковое количество раз.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волобуев К.А., Трубин И.В., Трубин В.Г. Обзор модуля цифро-аналогового преобразователя на базе микросхемы MCP4725 и модуля цифро-аналогового преобразователя на основе интегрирующей RC-цепи // Известия Томского политехнического университета. Промышленная кибернетика. – 2024. – Т. 2. – № 4. – С. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.18799/29495407/2024/4/72>
2. Оди́нец А.И., Науменко А.П. Цифровые устройства: АЦП и ЦАП. – Омск: Изд-во ИРСИД, 2006. – 48 с.
3. Проводит ли конденсатор ток. URL: <https://zen.ru/a/ZktBHxhtE1U6WHh8> (дата обращения: 14.09.2025).
4. Волков О.Ю. Практикум по радиоэлектронике аналоговые схемы. – М.: Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, 2016. – 84 с.
5. Матвиенко В.А. Основы теории цепей. – Екатеринбург: УМЦ УПИ, 2016. – 162 с.
6. Сорокин Г.А. Фильтры нижних частот // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2015. – Т. 15. – № 1. – С. 100–107. EDN: TGZUOZ
7. Магерамов Р.В. Активные и пассивные электрические фильтры // Молодой ученый. – 2017. – № 2 (136). – С. 148–152. EDN: XIFMAL
8. Цифро-аналоговые преобразователи. Принцип работы ЦАП на основе ШИМ. URL: <https://studfile.net/preview/5687475/page:22/> (дата обращения: 14.09.2025).
9. ГОСТ 16465-70 «Сигналы радиотехнические измерительные. Термины и определения».
10. Гребенников В.В. Теория электрических цепей. Виды, параметры и представление электрических сигналов. URL: [https://portal.tpu.ru/SHARED/g/GREBENNIKOVVV/umm\\_disciplines\\_tec/Tab/lecture\\_tec\\_signals.pdf](https://portal.tpu.ru/SHARED/g/GREBENNIKOVVV/umm_disciplines_tec/Tab/lecture_tec_signals.pdf) (дата обращения: 14.09.2025)

## Информация об авторах

**Кирилл Андреевич Волобуев**, студент, кафедра автоматики, Новосибирский государственный технический университет, Россия, 630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20; [kirya.volobuev@mail.ru](mailto:kirya.volobuev@mail.ru)

**Виолетта Михайловна Москалева**, студент, кафедра автоматики, Новосибирский государственный технический университет, Россия, 630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20; [violetta.moskaleva@mail.ru](mailto:violetta.moskaleva@mail.ru)

**Игорь Витальевич Трубин**, старший преподаватель, кафедра защиты информации, Новосибирский государственный технический университет, Россия, 630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20; [i.trubin@corp.nstu.ru](mailto:i.trubin@corp.nstu.ru); <https://orcid.org/0009-0001-1466-6001>

**Виталий Геннадьевич Трубин**, старший преподаватель, кафедра автоматики, Новосибирский государственный технический университет, Россия, 630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20; [info@kb-au.ru](mailto:info@kb-au.ru)

Поступила в редакцию: 24.09.2025

Поступила после рецензирования: 03.12.2025

Принята к публикации: 27.12.2025

## REFERENCES

1. Volobuev K.A., Trubin I.V., Trubin V.G. Overview of the digital-to-analog converter module based on the MCP4725 chip and the digital-to-analog converter module based on the integrating RC circuit. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Industrial Cybernetics*, 2024, vol. 2, no. 4, pp. 1–12. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.18799/29495407/2024/4/72>
2. Odinets A.I., Naumenko A.P. *Digital devices: ADC and DAC*. Omsk, IRSID Publ. House, 2006. 48 p. (In Russ.)
3. *Does a capacitor conduct current*. (In Russ.) Available at: <https://zen.ru/a/ZktBHxhtE1U6WHh8> (accessed: 14 September 2025).
4. Volkov O.Yu. *Practical training in radio electronics analog circuits*. Moscow, M.V. Lomonosov Moscow State University Publ., 2016. 84 p. (In Russ.)
5. Matvienko V.A. *Fundamentals of circuit theory*. Ekaterinburg, UMC UPI Publ., 2016. 162 p. (In Russ.)
6. Sorokin G.A. Filters of the lower frequencies. *Bulletin of the south Ural state university. series: computer technologies, automatic control, radio electronics*, 2015, vol. 15, no. 1, pp. 100–107. (In Russ.) EDN: TGZUOZ
7. Magerramov R.V. Active and passive electric filters. *Young scientist*, 2017, no. 2 (136), pp. 148–152. (In Russ.) EDN: XIFMAL
8. *Digital-to-analog converters. Operating principle of PWM-based DAC*. (In Russ.) Available at: <https://studfile.net/preview/5687475/page:22/> (accessed: 14 September 2025).
9. SS 16465 -70 Measuring radiotechnical signals. Terms and definitions.
10. Grebennikov V.V. *Theory of electrical circuits. Types, parameters and representation of electrical signals*. (In Russ.) Available at: [https://portal.tpu.ru/SHARED/g/GREBENNIKOVVV/umm\\_disciplines\\_tec/Tab/lecture\\_tec\\_signals.pdf](https://portal.tpu.ru/SHARED/g/GREBENNIKOVVV/umm_disciplines_tec/Tab/lecture_tec_signals.pdf) (accessed: 14 September 2025).

**Information about the authors**

**Kirill A. Volobuev**, Student, Novosibirsk State Technical University, 20, Karl Marks avenue, Novosibirsk, 630073, Russian Federation; kirya.volobuev@mail.ru

**Violetta M. Moskaleva**, Student, Novosibirsk State Technical University, 20, Karl Marks avenue, Novosibirsk, 630073, Russian Federation; violetta.moskaleva@mail.ru

**Igor V. Trubin**, Senior Lecturer, Novosibirsk State Technical University, 20, Karl Marks avenue, Novosibirsk, 630073, Russian Federation; i.trubin@corp.nstu.ru; <https://orcid.org/0009-0001-1466-6001>

**Vitaly G. Trubin**, Senior Lecturer, Novosibirsk State Technical University, 20, Karl Marks avenue, Novosibirsk, 630073, Russian Federation; trubin@corp.nstu.ru

Received: 24.09.2025

Revised: 03.12.2025

Accepted: 27.12.2025