

УДК 621.3.072.2
<http://doi.org/10.18799/29495407/2026/1/117>
Шифр специальности ВАК: 2.2.9
Научная статья



Особенности реализации цифро-аналогового преобразования на основе широтно-импульсной модуляции и RC-цепи

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

Новосибирский государственный технический университет, Российская Федерация, г. Новосибирск

✉info@kb-au.ru

Аннотация. В научной, учебной и технической деятельности часто требуется наличие плавной регулировки напряжения в определенном диапазоне. Большинство современных устройств управляются цифровыми микроконтроллерами, в связи с чем появляется необходимость в специализированных устройствах – модулях цифро-аналогового преобразования. Один из видов цифро-аналогового преобразования основывается на RC-цепи, которая преобразует широтно-импульсную модуляцию в аналоговый сигнал. Рассматриваются проблемы, которые возникают при подключении резистивной нагрузки к выходу RC-цепи, способы их устранения, а также особенности применения операционных усилителей в схемотехнических проектах. Также рассматривается использование операционного усилителя для получения активного фильтра нижних частот. При исследовании фильтрации рассматриваются методики расчета Бесселя, Баттерворта и Чебышева. Приводится сравнение результатов, полученных при фильтрации пассивным фильтром, с результатами, полученными при фильтрации активным фильтром. Статья будет полезна к ознакомлению студентам, инженерам, аспирантам, желающим изучить работу интегрирующей RC-цепи, широтно-импульсную модуляцию, цифро-аналогового преобразования, операционного усилителя и активного фильтра нижних частот.

Ключевые слова: аналоговый сигнал, интегрирующая RC-цепь, широтно-импульсная модуляция, цифро-аналоговое преобразование, операционный усилитель, активный фильтр, фильтр нижних частот

Для цитирования: Особенности реализации цифро-аналогового преобразования на основе широтно-импульсной модуляции и RC-цепи. К.А. Волобуев, В.М. Москалева, И.В. Трубин, В.Г. Трубин. *Известия Томского политехнического университета. Промышленная кибернетика*, 2026, Т. 4, № 1, С. 23–34. <http://doi.org/10.18799/29495407/2026/1/117>

Конфликт интересов: отсутствует.

UDC 621.3.072.2
<http://doi.org/10.18799/29495407/2026/1/117>
Scientific paper

Features of the implementation of a digital-to-analog conversion based on pulse-width modulation and an RC circuit

К.А. Volobuev, V.M. Moskaleva, I.V. Trubin, V.G. Trubin✉

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

✉info@kb-au.ru

Abstract. In scientific, educational, and technical applications, smooth voltage regulation over a specific range is often required. Most modern devices are controlled by digital microcontrollers, necessitating specialized devices – digital-to-analog conversion modules. One type of digital-to-analog conversion is based on an RC circuit that converts pulse-width modulation into an

analog signal. Connecting a resistive load to the output of the RC circuit can be thought of as a voltage divider, causing the output voltage to deviate from the expected value. To reduce the error introduced by the connected load, an operational amplifier is used in follower mode. The use of an operational amplifier to create an active low-pass filter is also discussed. The study of filtering considers Bessel, Butterworth, and Chebyshev calculation methods. A comparison of the results obtained with a passive filter and those obtained with an active filter is provided. This article will be useful for students, engineers, and post-graduates who want to study the operation of an integrating RC circuit, pulse-width modulation, digital-to-analog conversion, operational amplifiers, and active low-pass filter.

Keywords: analog signal, RC integration circuit, pulse-width modulation, digital-to-analog conversion, operational amplifier, active filter, low-pass filter

For citation: Volobuev K.A., Moskaleva V.M., Trubin I.V., Trubin V.G. Features of the implementation of a digital-to-analog conversion based on pulse-width modulation and an RC circuit. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Industrial Cybernetics*, 2026, vol. 4, no. 1, pp. 23–34. <http://doi.org/10.18799/29495407/2026/1/117>

Conflict of interest: none.

Введение

Современные цифровые управляющие устройства имеют достаточное количество дискретных входов и выходов, которые широко используются благодаря их относительной простоте и надёжности. Однако не все процессы можно передать с помощью всего двух состояний. Для научной, учебной и промышленной деятельности нередко требуется аналоговый сигнал. В рамках статьи [1] рассмотрен принцип работы цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) на основе широтно-импульсной модуляции (ШИМ) и разобраны некоторые особенности использования *RC-цепей*.

Данная работа является продолжением исследования схемотехники ЦАП на основе ШИМ и рассматривает особенности использования операционных усилителей в схеме ЦАП.

Подключение нагрузки к RC-цепи

ЦАП предназначен для преобразования числа (цифрового кода) в напряжение или ток. Более подробно преобразование цифрового сигнала в аналоговый приведено в статье [2].

Простейший ЦАП можно представить в виде интегрирующей *RC-цепи*. Время установления выходного сигнала и пульсации на выходе зависят от постоянной времени $\tau=RC$. Чтобы уменьшить выходные пульсации и не слишком сильно увеличить время установления выходного сигнала за счёт большого значения τ , рекомендуется сделать многозвенную интегрирующую цепь. Для получения наилучшего результата желательно, чтобы сопротивление каждого последующего звена было на порядок больше предыдущего, а ёмкость – на порядок меньше. Более подробно описанные процессы рассмотрены в статье [1].

В статье [1] рассматривается интегрирующая цепь, к выходу которой подключаются только мультиметр или осциллограф. Данные измерительные приборы имеют высокое сопротивление (обычно

1–10 МОм). Предположим, напряжение на выходе ЦАП изменяется в диапазоне 0–10 В, следовательно, ток, протекающий через мегаомные сопротивления, измеряется в микроамперах, поэтому практически не оказывает влияния на выходной сигнал цепи. Однако на практике ЦАП зачастую нужны для управления устройствами, которые требуют большего тока, поэтому при подключении нагрузки напряжение на выходе интегрирующей цепи может сильно уменьшиться. Данный эффект смоделирован в программе *Proteus*, результат рассмотрен на рис. 1.

Входной сигнал схемы – ШИМ с частотой 10 кГц, коэффициентом заполнения 50 % и амплитудой 10 В. Как видно из рис. 1, при подключении к выходу нагрузки, сопоставимой по сопротивлению с сопротивлением самой цепи, напряжение на выходе падает более чем в 2 раза. Это связано с тем, что нагрузка и интегрирующая цепь образуют собой резистивный делитель, у которого верхнее плечо – три последовательно включённых *RC-цепи* с суммарным сопротивлением 111 кОм, а нижнее плечо – нагрузка с сопротивлением 100 кОм. Исходя из этого, чтобы снизить влияние нагрузки на выходное напряжение, необходимо обеспечить разницу как минимум на порядок между сопротивлением интегрирующей цепи и сопротивлением нагрузки.

В статье [1] упоминалось, что наилучших результатов по времени переходного процесса и пульсациям в статическом режиме можно достичь при последовательном соединении нескольких звеньев *RC*, где каждое последующее звено имеет сопротивление в несколько раз больше предыдущего, а ёмкость – во столько же раз меньше. На рис. 1 приведена как раз такая модель. Если все сопротивления уменьшить в 10 раз, а все ёмкости увеличить в 10 раз, теоретически свойства фильтра должны сохраниться и обеспечится требуемая разница на порядок между сопротивлением интегрирующей цепи и сопротивлением нагрузки.

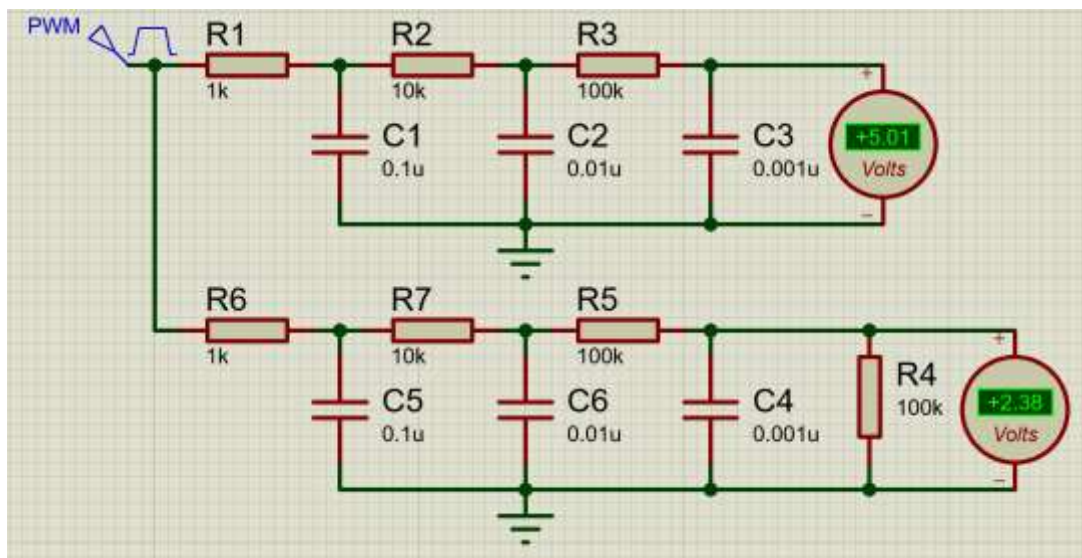


Рис. 1. Моделирование схем с интегрирующими RC-фильтрами без нагрузки и с нагрузкой
Fig. 1. Simulation of circuits with integrating RC-filters without and with load

Однако если уменьшить все сопротивления в 10 раз, то получится, что сопротивление первого резистора будет составлять 100 Ом, а следовательно, будет большой нагрев первого резистора из-за большего протекающего тока. Помимо этого, такое низкое сопротивление первого резистора может вывести из строя выход ШИМ, к которому он подключается, если тот не рассчитан на большие токи. Исходя из вышеперечисленного, уменьшать сопротивление RC-цепи для обеспечения разницы с сопротивлением нагрузки нецелесообразно.

Увеличивать сопротивление нагрузки тоже не всегда является конструктивно возможным. Следовательно, для данной задачи необходимо схемотехническое решение, которое будет установлено между выходом RC-цепи и нагрузкой, при этом оно должно выдавать напряжение такое же, как выдаёт RC-цепь, но с возможностью отдачи большего выходного тока. Для решения этой задачи подходит операционный усилитель (ОУ).

Основные свойства операционного усилителя

Операционный усилитель – это активный электронный элемент, который используется для усиления и обработки сигналов. Условные графические обозначения ОУ на схемах могут различаться в литературе, на рис. 2 приведены наиболее распространённые обозначения.

Питание ОУ может быть однополярным или двухполярным, в зависимости от модели усилителя. Величина питающего напряжения также может сильно различаться.

При проектировании электронных устройств важно учитывать, что диапазоны входного и выходного напряжения у ОУ должны быть меньше

диапазона напряжения питания (конкретные значения можно узнать из документации). В ситуациях, когда напряжение питания увеличивать уже нельзя, чтобы обеспечить достаточное напряжение на выходе, можно использовать специализированные Rail-to-Rail ОУ, которые имеют диапазон выходного напряжения более близкий к напряжению питания, чем у типовых ОУ.

На рис. 3, 4 приведены технические характеристики из документации [3], посвящённые диапазону напряжения питания ОУ LM358, диапазону входного напряжения и ограничениям выходного напряжения для низкого и высокого выходных уровней. Из приведённых на рисунках параметров можно заметить, что напряжение, подаваемое на входы LM358, не должно быть ниже V_{CC-} и не должно превышать $(V_{CC+} - 2\text{ В})$ (где V_{CC-} – это напряжение питания, приложенное к выводу GND микросхемы LM385, а V_{CC+} – напряжение питания, приложенное к выводу V_{CC} , здесь важно помнить, что данный ОУ может иметь как однополярное, так и двухполярное питание), иначе ОУ может выйти из строя.

При установке на выходе LM358 низкого уровня V_{OL} напряжение на выходе стремится к V_{CC-} и гарантированно не превышает $(V_{CC-} + 20\text{ мВ})$.

При установке на выходе LM358 высокого уровня V_{OH} напряжение на выходе стремится к V_{CC+} , но может не доходить до него на 1,5–4 В, в зависимости от напряжения питания и подключаемой нагрузки.

Типовое значение входного сопротивления реальных ОУ составляет несколько мегаом. Выходной ток обычно составляет от единиц до сотен миллиампер.

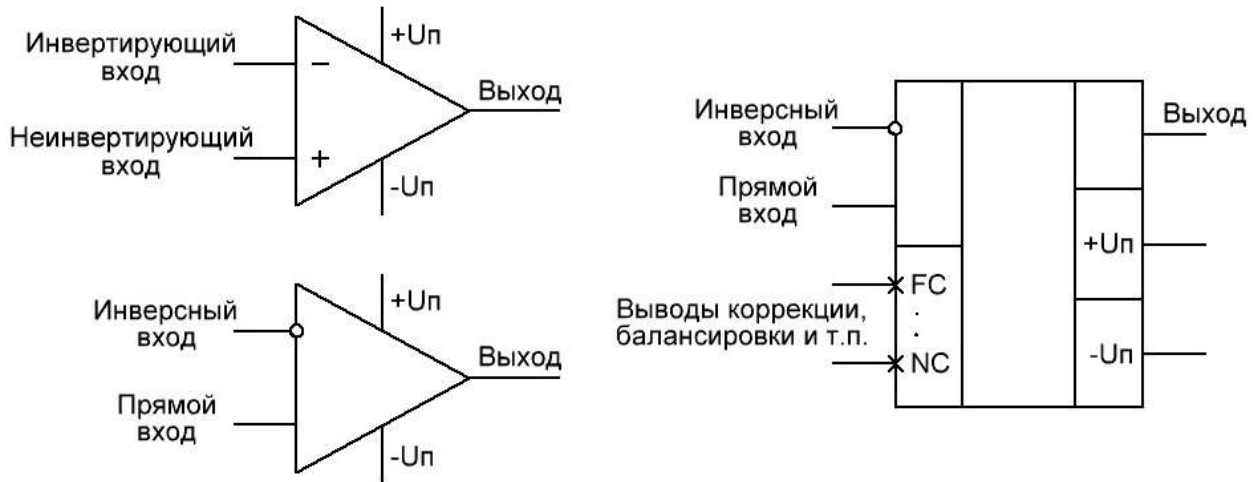


Рис. 2. Условные графические обозначения операционных усилителей
 Fig. 2. Conventional graphic symbols for operational amplifiers (op amp)

Absolute maximum ratings **LM158, LM258, LM358, LM158A, LM258A, LM358A**

Table 2: Operating conditions

Symbol	Parameter	Value	Unit
V_{CC}	Supply voltage	3 to 30	
V_{icm}	Common mode input voltage range $T_{amb} = 25^{\circ}C$ (1)	(V_{CC-}) to $(V_{CC+} - 1.5)$	V
	Common mode input voltage range ($T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$) (2)	(V_{CC-}) to $(V_{CC+} - 2)$	
T_{oper}	Operating free air temperature range	LM158	-55 to 125
		LM258	-40 to 105
		LM358	0 to 70

Рис. 3. Диапазон входных напряжений V_{icm} в документации
 Fig. 3. Input voltage range V_{icm} in the documentation

Electrical characteristics **LM158, LM258, LM358, LM158A, LM258A, LM358A**

Symbol	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Unit	
V_{OH}	High level output voltage	$V_{CC+} = 30\text{ V}$, $R_L = 2\text{ k}\Omega$ connected to V_{CC-} , $T_{amb} = 25^{\circ}C$	26	27		V
		$V_{CC+} = 30\text{ V}$, $R_L = 2\text{ k}\Omega$ connected to V_{CC-} , $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$	26			
		$V_{CC+} = 30\text{ V}$, $R_L = 10\text{ k}\Omega$ connected to V_{CC-} , $T_{amb} = 25^{\circ}C$	27	28		
		$V_{CC+} = 30\text{ V}$, $R_L = 10\text{ k}\Omega$ connected to V_{CC-} , $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$	27			
		$V_{CC+} = 5\text{ V}$, $R_L = 2\text{ k}\Omega$ connected to V_{CC-} , $T_{amb} = 25^{\circ}C$	3.5			
		$V_{CC+} = 5\text{ V}$, $R_L = 2\text{ k}\Omega$ connected to V_{CC-} , $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$	3			
V_{OL}	Low level output voltage	$R_L = 10\text{ k}\Omega$ connected to V_{CC-}		5	20	mV
		$T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$			20	

Рис. 4. Выходное напряжение при высоком уровне V_{OH} и при низком уровне V_{OL} в документации
 Fig. 4. Output voltage at high V_{OH} and low V_{OL} levels in the documentation

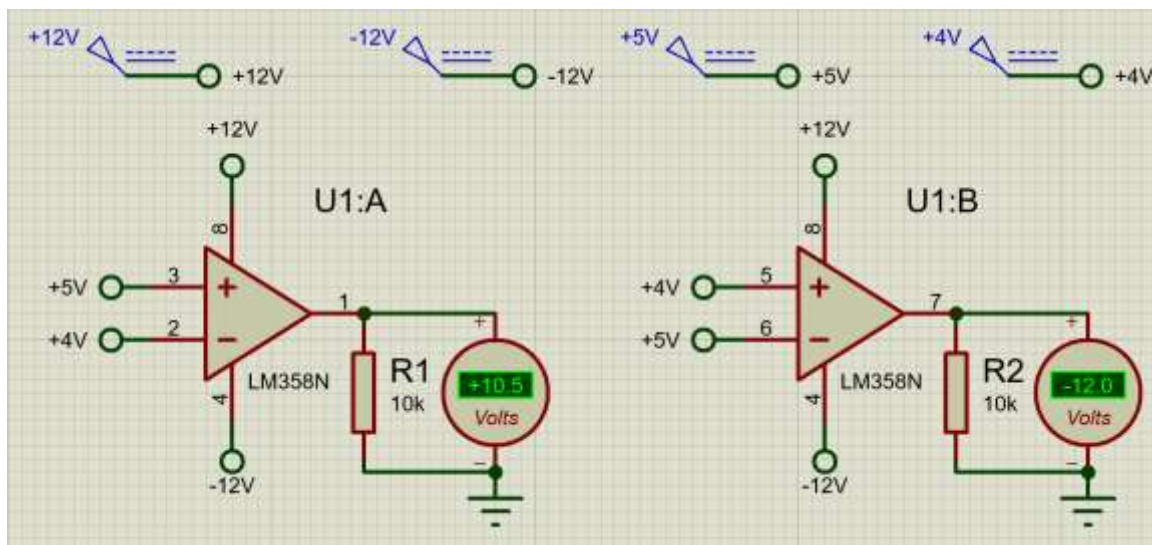


Рис. 5. Моделирование схемы с ОУ LM358 в режиме компаратора, двухполярное питание
Fig. 5. Simulation of a circuit with an LM358 op amp in comparator mode, bipolar supply

Коэффициент передачи идеального ОУ стремится к бесконечности и не зависит от частоты входных сигналов, задержка между входом и выходом отсутствует. Реальные ОУ ограничены по максимальной частоте сигнала и коэффициенту усиления внутренней схемотехникой, которая может сильно различаться в зависимости от сферы применения ОУ.

Принцип работы операционного усилителя

Для описания принципа работы ОУ, рассмотрим его работу без обратной связи (в режиме компаратора).

Если на неинвертирующем (положительном) входе напряжение будет выше, чем на инвертирующем (отрицательном), то напряжение на выходе усилителя стремится к плюсу питания ОУ (высокий уровень V_{OH}).

Если входное напряжение на неинвертирующем входе усилителя будет ниже, чем напряжение на инвертирующем, то напряжение на выходе усилителя стремится к минусу питания ОУ (низкий уровень V_{OL}). На рис. 5 приведены схемы включения ОУ LM358 в режиме компаратора с двухполярным питанием. Для однополярного питания результат будет аналогичным, только низкий уровень на выходе будет стремиться к напряжению 0 В. Из приведённого моделирования можно заметить, что низкому уровню напряжения на выходе ОУ соответствует отрицательное напряжение питания. Высокий уровень напряжения на выходе ОУ стремится к положительному напряжению питания и не доходит до него на 1,5 В. Как описывалось в предыдущем разделе, это объясняется внутренним устройством ОУ.

Несмотря на то, что ОУ можно использовать в режиме компаратора, на практике рекомендуется

использовать специализированные микросхемы компараторов. Более подробно можно почитать об этом в [4].

Увеличение выхода по току

Операционные усилители предназначены для усиления и обработки сигналов. За время своего существования они получили очень широкое распространение и имеют множество различных применений, ознакомиться с которыми можно в источниках [5–7].

На рис. 6 приведена схема повторителя на операционном усилителе. Так как выход ОУ соединён с инвертирующим входом (отрицательная обратная связь), будет стремиться установить на выходе напряжение как можно ближе к напряжению на неинвертирующем входе.

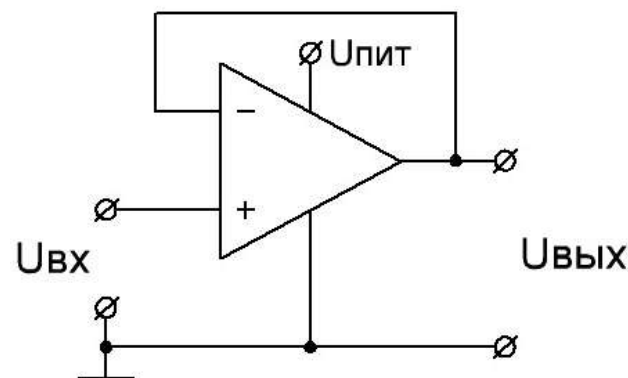


Рис. 6. Схема повторителя на ОУ
Fig. 6. Op amp repeater circuit

На рис. 7 приведён результат моделирования работы трёх схем *RC-цепей*, включенных без нагрузки, с нагрузкой, с ОУ и нагрузкой. На вход схем поступает ШИМ-сигнал с амплитудой 10 В и частотой 10 кГц, коэффициент заполнения ШИМ 50 %. Легко заметить, что напряжение на выходе ОУ даже с

учётом подключённой нагрузки не падает так сильно, как в случае с нагрузкой, подключённой напрямую к выходу *RC-цепи*.

Для того чтобы дополнительно усилить выход ОУ по току, можно добавить на выход транзистор в режиме эмиттерного повторителя [8] (рис. 8).

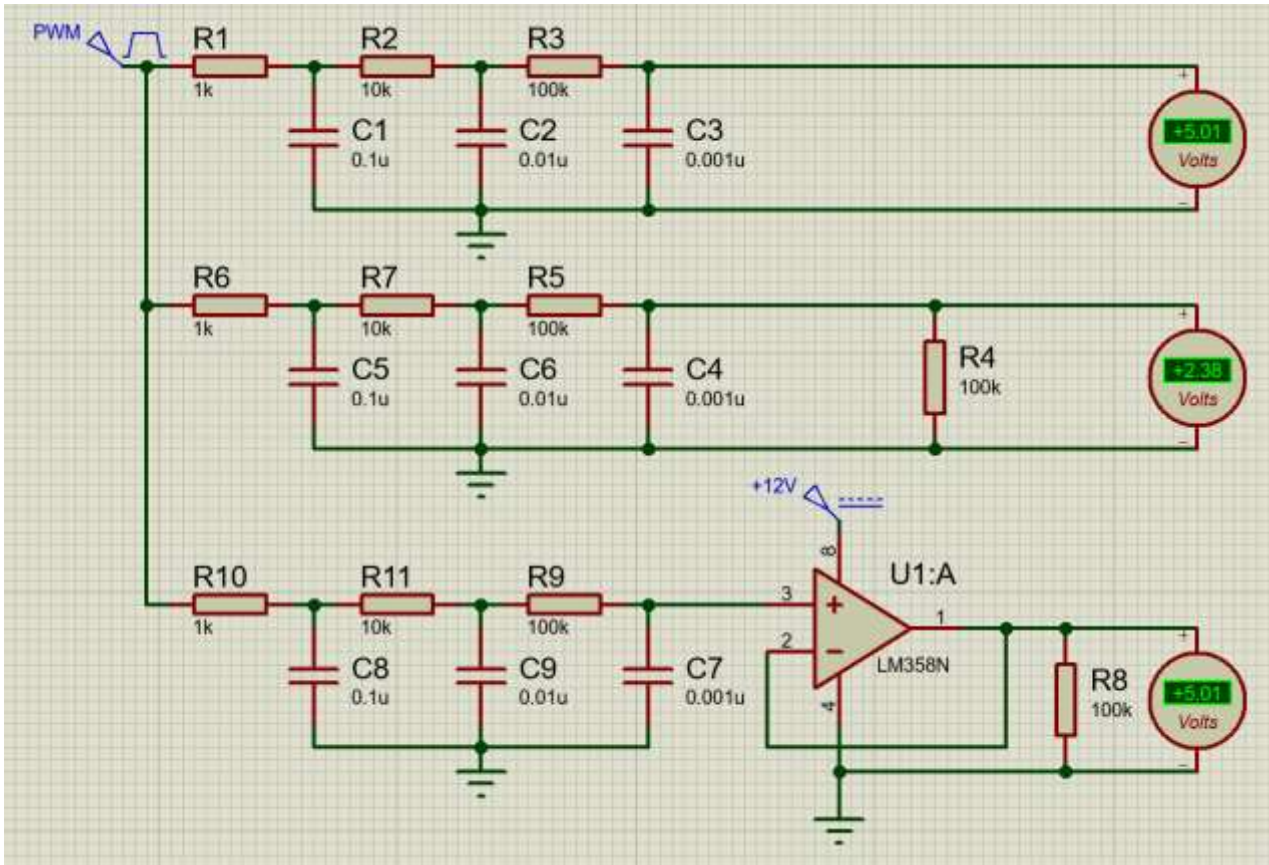


Рис. 7. Моделирование схем с интегрирующими *RC-фильтрами* без нагрузки, с нагрузкой, с ОУ и нагрузкой
Fig. 7. Simulation of circuits with integrating *RC-filters* without load, with load, with op amp and load

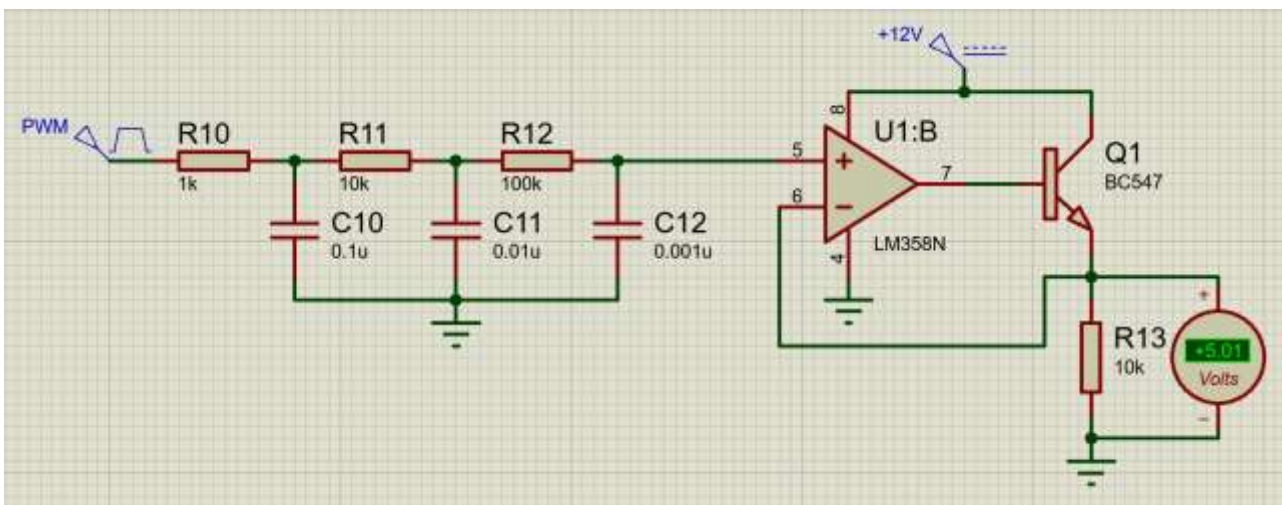


Рис. 8. Моделирование схемы с транзистором в режиме эмиттерного повторителя
Fig. 8. Simulation of a circuit with a transistor in emitter follower mode

Масштабирование напряжения на выходе

В некоторых схемах ОУ также может быть использован для масштабирования сигнала. На рис. 9 приведена схема неинвертирующего операционного усилителя. Она работает аналогично схеме повторителя, однако имеет резистивный делитель в обратной связи. За счет этого делителя можно реализовать усиление по напряжению.

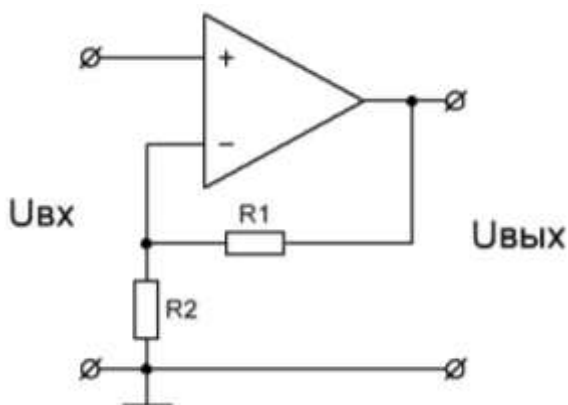


Рис. 9. Схема неинвертирующего усилителя
 Fig. 9. Non-inverting amplifier circuit

Напряжение на выходе неинвертирующего ОУ рассчитывается согласно формуле:

$$U_{\text{вых}} = \left(\frac{R_1}{R_2} + 1\right) \cdot U_{\text{вх}}$$

К примеру, на неинвертирующем входе ОУ напряжение составляет 5 В, резистор $R_1=51 \text{ кОм}$, резистор $R_2=51 \text{ кОм}$. Если подставить данные значения в формулу, получим, что напряжение на выходе будет в 2 раза больше напряжения на входе и составит 10 В при наличии достаточного питающего напряжения.

В качестве примера на рис. 10 приведено моделирование схемы неинвертирующего усилителя. При выполнении усиления с помощью ОУ важно помнить о том, что помимо полезного сигнала будут усилены также шумы и пульсации, присутствующие на входе ОУ. На рис. 11 показана осциллограмма, по которой можно заметить, что пульсации на выходе ОУ увеличились в 2 раза.

Активные фильтры

Пассивные фильтры работают исключительно на базе пассивных компонентов (резисторов и конденсаторов). Активные фильтры включают в себя активные элементы, такие как операционные усилители и транзисторы. При проектировании активных фильтров чаще используются операционные усилители, так как они упрощают синтез схемы фильтра.

Схемотехника активного фильтра отличается в зависимости от порядка фильтра. Помимо этого, существуют разные методики расчёта активных фильтров, которые позволяют выбирать более предпочтительные свойства (уровень неравномерности в полосах пропускания и задерживания, крутизну фронта и среза, время переходного процесса и т. д.).

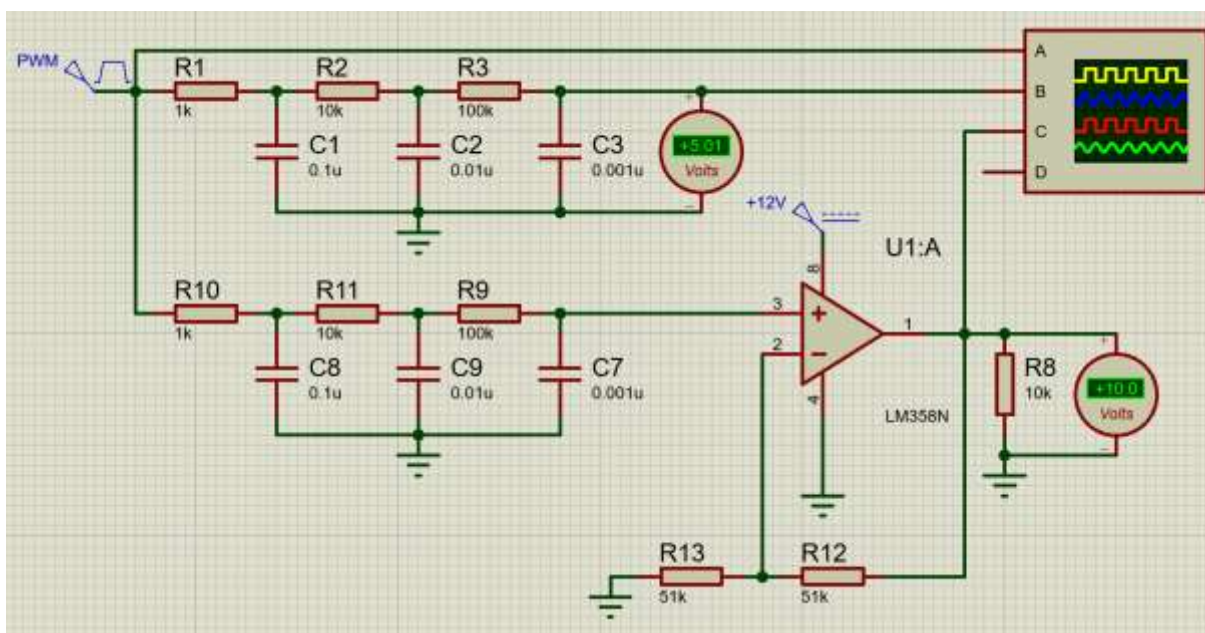


Рис. 10. Моделирование схемы с ОУ в качестве усилителя по напряжению
 Fig. 10. Simulation of a circuit with an op amp as a voltage amplifier

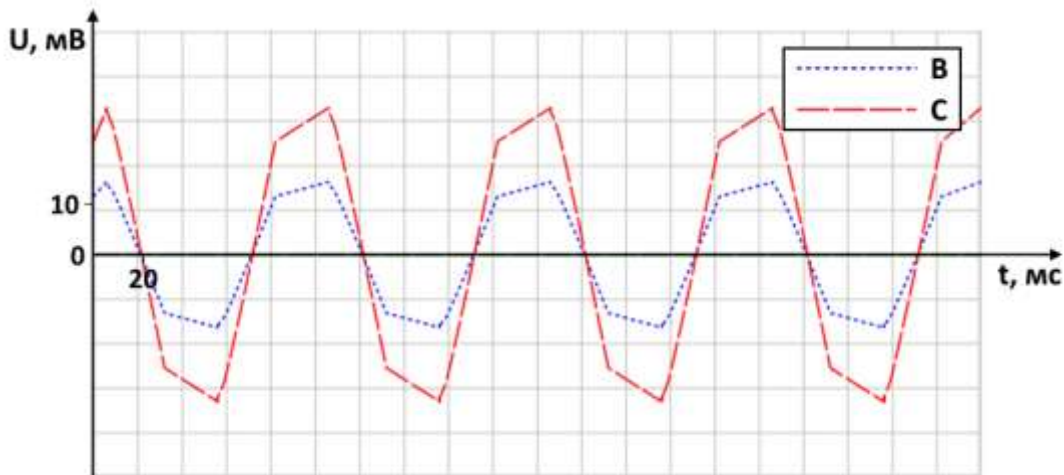


Рис. 11. Увеличение пульсаций при использовании ОУ в качестве усилителя по напряжению
Fig. 11. Increased ripple when using an op amp as a voltage amplifier

Произведём сравнение трёхзвенного пассивного фильтра и активного фильтра третьего порядка. При проектировании активного фильтра воспользуемся наиболее распространёнными методиками расчёта: Бесселя, Баттерворта и Чебышева. Для удобства расчёта был использован онлайн калькулятор [9].

Для проведения сравнения работы активных фильтров и пассивного фильтра зададим у всех одинаковую частоту среза. За основу возьмём частоту среза пассивного фильтра нижних частот, рассмотренного выше. Так как рассматриваемый пассивный фильтр состоит из нескольких последовательно соединённых звеньев RC, его частота среза равна наименьшей из частот среза установленных RC-звеньев. В данном случае частота среза каждого из трёх установленных звеньев равна 1,59 кГц. Вычислить частоту среза звена RC-фильтра можно по формуле:

$$f = \frac{1}{2\pi RC}$$

Во всех расчётах активных фильтров используется 3-й порядок фильтра, сопротивления резисторов $R1=R2=R3=10$ кОм. Результаты расчётов приведены к стандартному ряду конденсаторов E24 и представлены в таблице.

На рис. 12 изображены схемы трёхзвенного пассивного фильтра (вход осциллографа A) и схема активного фильтра с номиналами, полученными при расчёте методом Бесселя. Схемы для двух других методов расчёта аналогичные, в них будут различаться только значения ёмкостей конденсаторов. Фильтры, рассчитанные по методикам Бесселя, Баттерворта и Чебышева подключены к входам осциллографа B, C, D соответственно. Выбор фильтра должен определяться требованиями к системе.

На рис. 13 представлены графики амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) рассматриваемых

фильтров. Наиболее сильное ослабление сигнала производит фильтр Чебышева, однако можно заметить неравномерность в полосе пропускания фильтра (всплеск вблизи частоты среза). Исходя из графиков переходного процесса на рис. 14 и пульсаций на рис. 15 в статическом режиме можно заметить, что для применения в ЦАП на основе ШИМ наилучший результат при сравнении трёх методик проектирования активных фильтров показывает методика расчёта Баттерворта.

Таблица. Номиналы конденсаторов для активных фильтров, приведенные к ряду E24

Table. Capacitor ratings for active filters, reduced to the E24 series

Методика расчёта фильтра Filter calculation method	C1	C2	C3	Канал осциллографа Oscilloscope channel
	нФ/nF			
Бесселя/Bessel	6,2	16,0	3,3	B (синий/blue)
Баттерворта Butterworth	13,0	36,0	2,0	C (красный/red)
Чебышева Chebyshev	27,0	160,0	0,62	D (зеленый/green)

Результаты на практике

Соберём на практике активный фильтр по методике расчёта Баттерворта, так он показал наилучший результат при моделировании.

На рис. 16 отображён переходный процесс (по горизонтали 100 мкс/клетка и по вертикали 1 В/клетка), из графика видно, что переходный процесс занимает около 700 мкс. На рис. 17 отображена осциллограмма пульсаций (по горизонтали 20 мкс/клетка и по вертикали 20 мВ/клетка) в статическом режиме, из графика видно, что амплитуда пульсаций около 36 мВ.

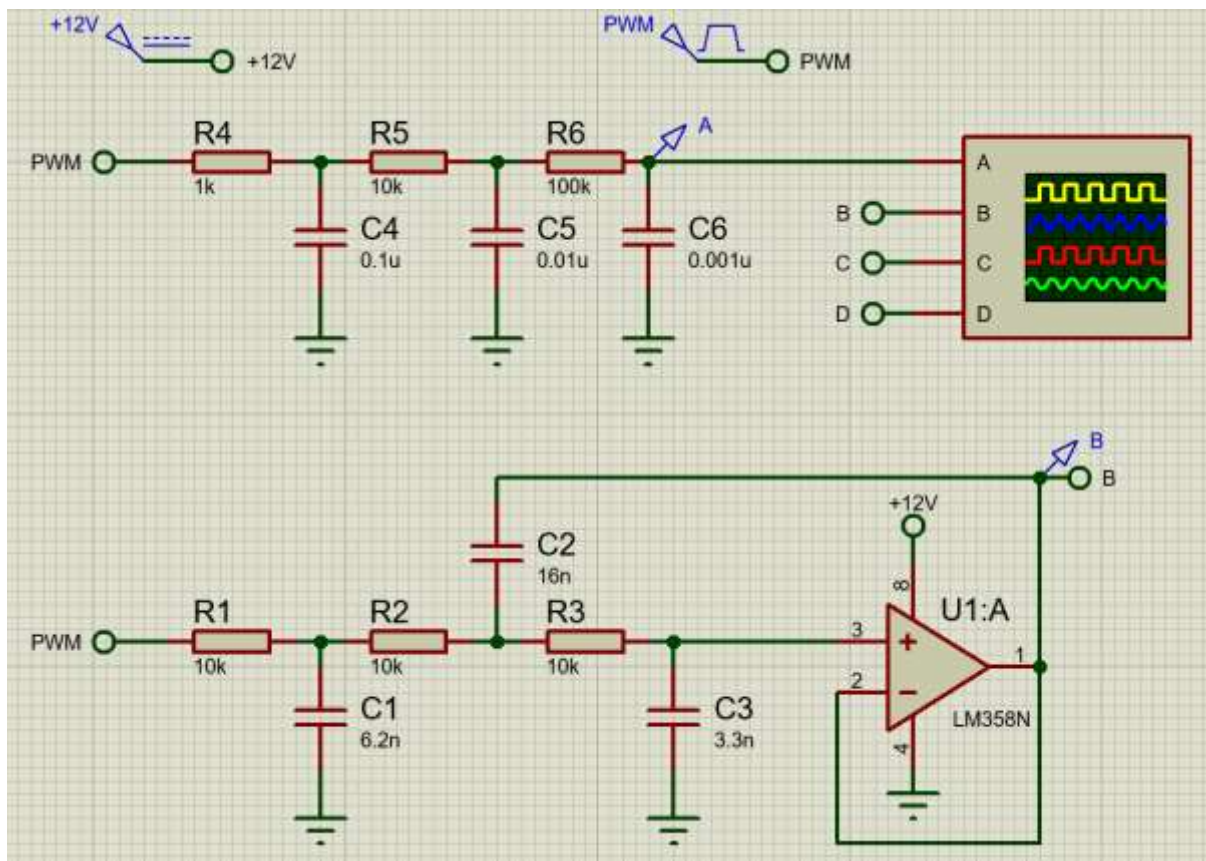


Рис. 12. Моделирование схем пассивного и активного фильтров
 Fig. 12. Simulation of the passive and active filter circuits

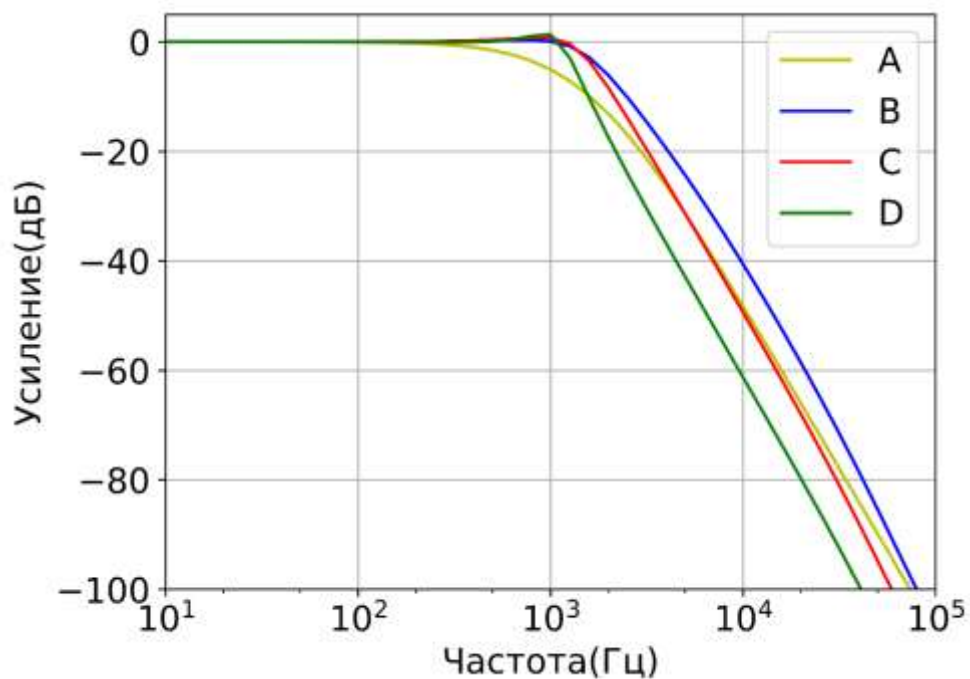


Рис. 13. График АЧХ для пассивного фильтра и активных фильтров Бесселя, Баттерворта, Чебышева
 Fig. 13. Frequency response graph for a passive filter and active Bessel, Butterworth, and Chebyshev filters

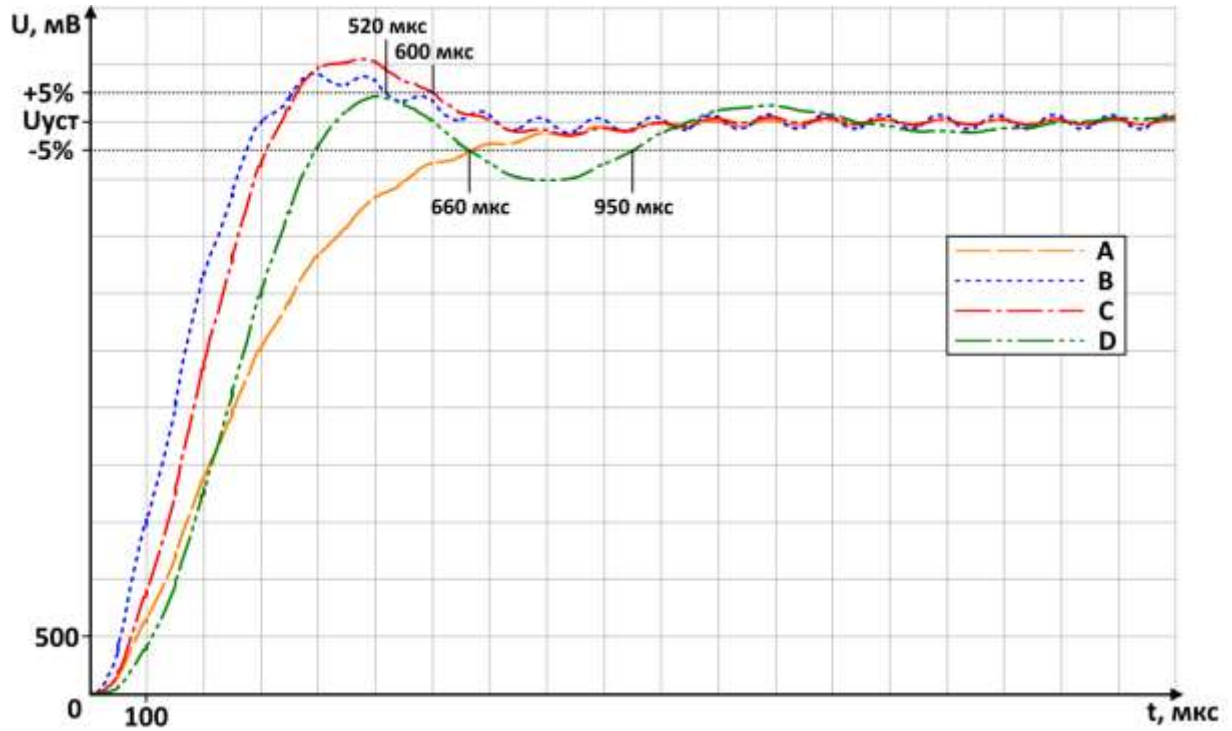


Рис. 14. Переходный процесс для пассивного фильтра и активных фильтров Бесселя, Баттерворта, Чебышева
Fig. 14. Transient process for a passive filter and active Bessel, Butterworth, Chebyshev filters

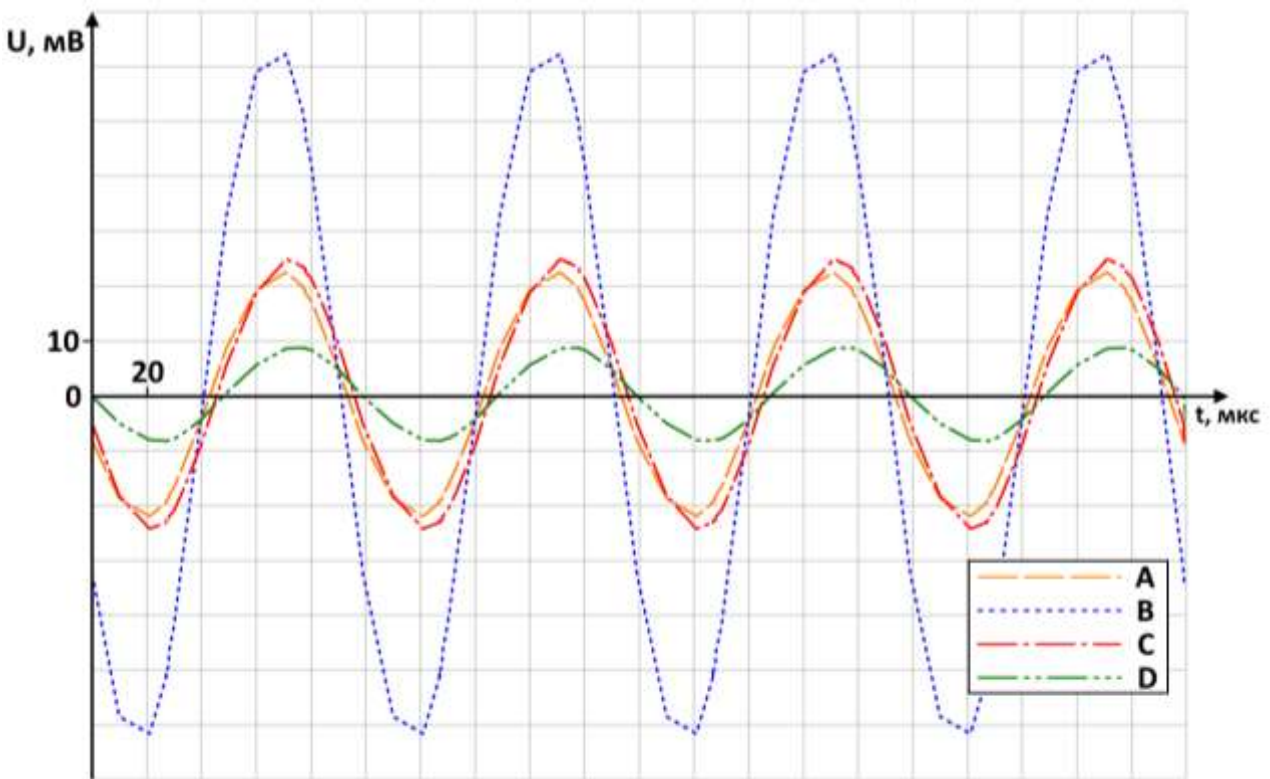


Рис. 15. Пульсации для пассивного фильтра и активных фильтров Бесселя, Баттерворта, Чебышева
Fig. 15. Ripples for passive filter and active Bessel, Butterworth, Chebyshev filters



Рис. 16. Переходный процесс при уставке напряжения 5 В
Fig. 16. Transient process at a voltage setting of 5 V



Рис. 17. Пульсации при уставке напряжения 5 В
Fig. 17. Ripple at 5 V voltage setting

Можно заметить, что результаты, полученные на практике, отличаются от полученных при моделировании. Данные отличия можно объяснить тем, что при реализации устройства на практике номиналы реальных компонентов имели погрешность (резисторы 1 %, конденсаторы 10 %).

Выводы

При проектировании электронных устройств важно учитывать, что диапазоны входного и выходного напряжения у ОУ должны быть меньше диапазона напряжения питания (конкретные значения можно узнать из документации). В ситуациях, когда напряжение питания увеличивать уже нельзя, чтобы обеспечить достаточное напряжение на выходе, можно использовать специализированные *Rail-to-Rail* ОУ, которые имеют диапазон выходного напряжения более близкий к напряжению питания, чем типовые ОУ.

Использование операционных усилителей позволяет подключить нагрузку к выходу ЦАП на основе *RC-цепи* с незначительными искажениями выходного сигнала. Помимо этого, ОУ позволяет масштабировать сигнал на выходе, изменяя его до требуемого значения без изменения амплитуды входного сигнала.

Для ряда задач использование активного фильтра на базе ОУ позволяет получить требуемые свойства фильтра. Использование активного фильтра в схемах ЦАП на основе ШИМ не даёт значительных преимуществ по сравнению с использованием пассивного фильтра. Характеристики реального активного фильтра могут значительно отличаться от рассчитанного теоретически из-за того, что реальные ёмкости и сопротивления имеют погрешности и ограничены стандартными рядами (номиналами). В связи с этим для использования в схемах ЦАП более предпочтительным будет пассивный фильтр.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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
2. Волобуев К.А., Трубин И.В., Трубин В.Г. Обзор модуля цифро-аналогового преобразователя на базе микросхемы МСР4725 и модуля цифро-аналогового преобразователя на основе интегрирующей *RC-цепи*. *Известия Томского политехнического университета. Промышленная кибернетика*, 2024, Т. 2, № 4, С. 1–12. DOI: 10.18799/29495407/2024/4/72
3. *LM158, LM258, LM358, LM158A, LM258A, LM358A. Low-power dual operational amplifiers*. URL: <https://static.chipdip.ru/lib/567/DOC011567167.pdf> (дата обращения: 09.03.2026).
4. *Почему операционный усилитель – плохой компаратор*. URL: <https://habr.com/ru/companies/yadro/articles/963418/> (дата обращения: 09.03.2026).
5. *Операционные усилители: 10 схем на (почти) все случаи жизни*. URL: <https://habr.com/ru/articles/508530/> (дата обращения: 09.03.2026).
6. Хоровиц П., Хилл У. *Искусство схемотехники*. М.: Изд-во БИНОМ, 2015. 704 с. URL: <https://djvu.online/file/TG3Z3bvcm9jSO> (дата обращения: 09.03.2026).
7. *Применение операционных усилителей*. URL: https://portal.tpu.ru/SHARED/g/GREBENNIKOVVV/umm_disciplines_electronics_1_2/Tab1/Tab/21_Electronics_12_OpAmp_Application_2016.pdf (дата обращения: 09.03.2026).
8. *Эмиттерный повторитель – ключ к пониманию работы транзисторных каскадов*. URL: <https://habr.com/ru/companies/ruvds/articles/832252/> (дата обращения: 09.03.2026).
9. *Онлайн калькулятор активных фильтров на операционных усилителях*. URL: <https://vprayaem.ru/information3.html> (дата обращения: 09.03.2026).

Информация об авторах

Кирилл Андреевич Волобуев, студент, кафедра автоматики, Новосибирский государственный технический университет, Российская Федерация, 630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20; kirya.volobuev@mail.ru

Виолетта Михайловна Москалева, студент, кафедра автоматики, Новосибирский государственный технический университет, Российская Федерация, 630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20; violetta.moskaleva@mail.ru

Игорь Витальевич Трубин, старший преподаватель, кафедра защиты информации, Новосибирский государственный технический университет, Российская Федерация, 630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20; tiv.kba@ya.ru

Виталий Геннадьевич Трубин, старший преподаватель, кафедра автоматики, Новосибирский государственный технический университет, Российская Федерация, 630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20; info@kb-au.ru

Поступила: 07.03.2026

Принята: 18.03.2026

Опубликована: 30.03.2026

REFERENCES

1. Volobuev K.A., Moskalyova 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. (In Russ.) DOI: 10.18799/29495407/2025/4/104
2. 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: 10.18799/29495407/2024/4/72
3. LM158, LM258, LM358, LM158A, LM258A, LM358A. *Low-power dual operational amplifiers*. Available at: <https://static.chipdip.ru/lib/567/DOC011567167.pdf> (accessed: 9 March 2026).
4. *Why an operational amplifier is a bad comparator*. (In Russ.) Available at: <https://habr.com/ru/companies/yadro/articles/963418/> (accessed: 9 March 2026).
5. *Operational amplifiers: 10 circuits for (Almost) every occasion*. (In Russ.) Available at: <https://habr.com/ru/articles/508530/> (accessed: 9 March 2026).
6. Horowitz P., Hill W. *The art of circuit design*. Moscow, BINOM Publ. House, 2015. 704 p. (In Russ.) Available at: <https://djvu.online/file/TG3Z3bvcm9jSO> (accessed: 9 March 2026).
7. *Applications of operational amplifiers*. (In Russ.) Available at: https://portal.tpu.ru/SHARED/g/GREBENNIKOVVV/umm_disciplines_electronics_1_2/Tab1/Tab/21_Electronics_12_OpAmp_Application_2016.pdf (accessed: 9 March 2026).
8. *Emitter follower – the key to understanding the operation of transistor cascades*. (In Russ.) Available at: <https://habr.com/ru/companies/ruvds/articles/832252/> (accessed: 9 March 2026).
9. *Online calculation of active filters using op amps and transistors*. (In Russ.) Available at: <https://vpayaem.ru/information3.html> (accessed: 9 March 2026).

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; tiv.kba@ya.ru

Vitaly G. Trubin, Senior Lecturer, Novosibirsk State Technical University, 20, Karl Marks avenue, Novosibirsk, 630073, Russian Federation; info@kb-au.ru

Received: 07.03.2026

Revised: 18.03.2026

Accepted: 30.03.2026