**Исследование начинающих ученых**
**УДК 51–74**
**DOI: 10.46418/3033-7852_2026_3_3_105–110**



# СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПАССИВНЫХ СГЛАЖИВАЮЩИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ФИЛЬТРОВ И ИХ МОДЕЛИРОВАНИЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ QUCS-S ДЛЯ БЛОКОВ ПИТАНИЯ

**Алексей Иванович Рожков, Дмитрий Константинович Никифоров**

Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (Калужский филиал), г. Калуга, Россия

© Рожков А. И., Никифоров Д. К., 2026

*Автор-корреспондент: Д. К. Никифоров, e-mail: dm_nikif@rambler.ru*

## АННОТАЦИЯ

В статье выполнен сравнительный анализ трёх типов пассивных сглаживающих фильтров (ёмкостного, индуктивного и индуктивно-ёмкостного) для выпрямителей блоков питания с выходным напряжением 5 В. Моделирование проведено в среде Qucs-S при нагрузке 10 Ом и частоте пульсаций 100 Гц. Подобраны параметры элементов, обеспечивающие амплитуду пульсаций не более 0,1 В. Показано, что LC-фильтр является оптимальным по габаритам и стоимости.

**Ключевые слова:** пассивные сглаживающие фильтры, Qucs-S, моделирование, пульсации напряжения, индуктивный фильтр, ёмкостный фильтр, LC-фильтр, выпрямитель

**Для цитирования:** Рожков А. И., Никифоров Д. К. Сравнительный анализ пассивных сглаживающих электрических фильтров и их моделирование с использованием Qucs-S для блоков питания // Технология и энергетика. 2026. № 3 (3). С. 105–110. DOI: 10.46418/3033-7852_2026_3_3_105–110.

# COMPARATIVE ANALYSIS OF PASSIVE SMOOTHING FILTERS AND THEIR SIMULATION USING QUCS-S FOR POWER SUPPLIES

**Aleksey Ivanovich Rozhkov, Dmitry Konstantinovich Nikiforov**

Bauman Moscow State Technical University (Kaluga Branch), Kaluga, Russia

*Corresponding author: D. K. Nikiforov, e-mail: dm_nikif@rambler.ru*

## ABSTRACT

The paper presents a comparative analysis of three types of passive smoothing filters (capacitive, inductive, and LC) for power supply rectifiers with a 5 V output voltage Modeling was conducted in the Qucs-S environment at a load of 10 Ω and a ripple frequency of 100 Hz. The parameters of the elements have been selected to ensure a ripple amplitude of no more than 0.1 V. It is shown that the LC filter is optimal in terms of dimensions and cost.

**Keywords:** passive smoothing filters, Qucs-S, simulation, voltage ripple, inductive filter, capacitive filter, LC filter, rectifier

**For citation:** Rozhkov A. I., Nikiforov D. K. (2026) 'Comparative analysis of passive smoothing electrical filters and their modeling using Qucs-S for power supplies', Technology and Energy, 2026, no. 3(3), pp. 105–110. DOI: 10.46418/3033-7852_2026_3_3_105–110.

## ВВЕДЕНИЕ

Электрический фильтр — это цепь, предназначенная для выделения колебаний в определенном диапазоне частот. Диапазон частот, пропускаемых фильтром, называется полосой пропускания, или полосой прозрачности. Диапазон частот, подавляемых фильтром, называется полосой задерживания, или полосой непрозрачности [1, с. 61].

Классификация фильтров в соответствии с диапазоном пропускаемых частот:

- фильтр нижних частот (ФНЧ) — это фильтр, полоса пропускания которого лежит в пределах от 0 до некоторой граничной частоты $f_c$, называемой частотой среза;
- фильтр верхних частот (ФВЧ) — это фильтр, полоса пропускания которого лежит в пределах от частоты $f_c$ до ∞;
- полосовой фильтр (ПФ) — это фильтр, полоса пропускания которого лежит в пределах между нижней $f_{c1}$ и верхней $f_{c2}$ частотами среза;
- режекторный фильтр (РФ), также называемый заграждающим фильтром (ЗФ) — это фильтр, полоса задерживания которого лежит в пределах от $f_{c1}$ до $f_{c2}$.

Включаемый в цепь выхода выпрямителя фильтр для сглаживания пульсаций, по существу, является фильтром нижних частот, так как он должен пропускать только ток нулевой частоты, т. е. постоянную составляющую выпрямленного тока, и задерживать все его переменные составляющие [2, с. 117].

Сглаживающий фильтр с конденсаторным входом даёт при прочих равных условиях выход постоянного тока с более высоким напряжением, чем фильтр с индуктивным входом, но он требует, чтобы выпрямитель мог безопасно пропускать большие пики тока, необходимые для зарядки конденсатора [2, с. 120].

Упрощенный расчет сглаживающих фильтров можно производить следующим образом. Прежде всего определяют необходимую емкость конденсатора на входе фильтра. Эта емкость может быть определена по формуле

$$C \approx \frac{0.25}{f \cdot R_э \cdot a},$$

где $a$ — коэффициент пульсации, равный $\frac{U_1}{U_0}$,

где, в свою очередь, $U_1$ — амплитуда переменной составляющей выпрямленного пульсирующего напряжения;
$U_0$ — постоянная составляющая выпрямленного напряжения;
$f$ — частота пульсаций;
$R_э$ — сопротивление эффективной нагрузки выпрямителя.

Все эти величины зависят от мощности выпрямительной установки и в каждом отдельном случае могут быть подсчитаны. Коэффициент пульсаций $a$ берут от 0,05 до 0,2 в зависимости от величины сопротивления $R_э$; чем больше сопротивление $R_э$, тем меньше коэффициент пульсаций [2, с. 121].

RC-фильтры обычно используют в ситуациях, когда требования к степени подавления пульсаций не столь жёсткие, как для других типов фильтров, а также когда в цепи фильтра проходит не только переменная, но и постоянная составляющая тока, а на сопротивление необходимо выделить падение напряжения постоянной составляющей. Эффективность сглаживания такого фильтра повышается с ростом сопротивления R и ёмкости конденсатора C. Однако увеличение сопротивления приводит к значительным потерям напряжения на нём за счёт постоянного тока, что снижает уровень постоянного напряжения на нагрузке. Данный тип фильтра допустимо применять лишь при малом значении постоянной составляющей выпрямленного тока.

Выпрямительными называются устройства преобразования электрической энергии переменного тока в энергию постоянного тока. Выпрямительное устройство в большинстве случаев состоит из трех основных элементов: трансформатора, преобразующего переменное напряжение питающей сети в более высокое или низкое напряжение; группы полупроводниковых диодов, осуществляющих выпрямление переменного напряжения, и сглаживающего фильтра, уменьшающего пульсацию выпрямленного напряжения [3, с. 88].

Выпрямители характеризуются рядом показателей, основными из которых являются [4]:

- коэффициент пульсаций: $K_{(k)} = \frac{U_{m(k)}}{U_0}$ — отношение амплитуды $k$-й гармоники пульсаций к средневыпрямленному значению напряжения (постоянной составляющей);
- коэффициент выпрямления по напряжению: $K_{ои} = \frac{U_0}{U_2}$ — отношение средневыпрямленного значения напряжения к действующему значению напряжения во вторичной цепи трансформатора;
- пульсность (число фаз выпрямления): $p = \frac{f_n}{f} = \frac{T}{T_n} = k \cdot q$ — отношение частоты пульсации к частоте питающего напряжения, $k$ — число вторичных обмоток, $q$ — число полупериодов выпрямления — число импульсов тока через одну обмотку за период сети (1 или 2);
- коэффициент полезного действия (КПД): $\eta_B = \frac{P_{вых}}{P_{вх}}$ — отношение активной (полезной) мощности в нагрузке к потребляемой мощности.

Критерием качества сглаживающих свойств фильтров является коэффициент сглаживания равный отношению коэффициентов пульсаций на входе и выходе фильтра:

$$q = \frac{K_{\text{Пвх}}}{K_{\text{Пвых}}} = \frac{U_{m1}}{U_{m2}} \cdot \frac{U_{02}}{U_{01}},$$

где $U_{m1}$ — амплитуда пульсации на входе;
$U_{m2}$ — амплитуда пульсации на выходе;
$U_{01}$ — среднее значение напряжения на входе;
$U_{02}$ — среднее значение напряжения на выходе.

К фильтрам предъявляется еще ряд требований: минимальные габаритные размеры, масса и стоимость; отсутствие искажений, вносимых в работу нагрузки; отсутствие недопустимых перенапряжений и бросков тока при переходных процессах и устойчивость системы с фильтром; высокая надежность [3].

Индуктивный (L) сглаживающий фильтр представляет собой катушку с ферромагнитным сердечником (дроссель), включаемую последовательно с нагрузкой. Индуктивный фильтр является «габаритным» устройством, поэтому для уменьшения его размеров стараются повысить частоту пульсаций в звене выпрямителя. Данный фильтр используется в цепях с повышенными токами нагрузки. При возрастании тока нагрузки (уменьшении $R_н$) происходит увеличение энергии, накапливаемой в дросселе, увеличивается ЭДС самоиндукции, что препятствует прохождению в нагрузку переменной составляющей тока и улучшаются сглаживающие свойства фильтра [4, с. 85].

Емкостный (С) сглаживающий фильтр представляет собой конденсатор, включаемый параллельно нагрузке. Емкостный фильтр используются при малых токах нагрузки, так как с ростом тока уменьшается постоянная цепи разряда, что увеличивает пульсацию напряжения (из-за глубокого разряда конденсатора). К достоинствам фильтра можно отнести: отсутствие колебаний напряжения при переходных процессах, простота, небольшие габаритные размеры. Недостатком фильтра является: воздействие на выпрямитель (угол отсечки тока меньше 180 градусов), поэтому при использовании такого фильтра с большой величиной емкости необходимо вводить в звено выпрямителя защиту по току [4, с. 85].

Индуктивно-емкостный (LC) сглаживающий фильтр. При соблюдении условия $X_{др} > X_c$ реакция фильтра будет индуктивного характера. Дроссель и конденсатор, используемые совместно, более эффективно выполняют функции сглаживания, чем при их раздельном включении, если выполняются неравенства: $X_{др} >> R_н$ и $X_c << R_н$ [4, с. 85].

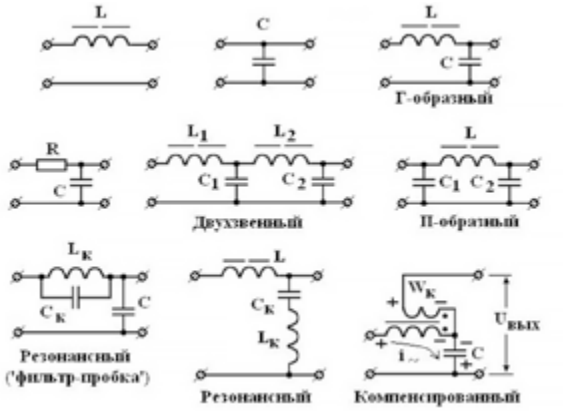



**Рисунок 1.** Схемы пассивных сглаживающих фильтров [4]
**Figure 1.** Passive smoothing filter circuits [4]

Данный тип фильтра применяют при высоких мощностях нагрузки. Среди его преимуществ: компактность, а также малая зависимость коэффициента сглаживания от изменений тока нагрузки. Однако имеются и недостатки: могут возникать резонансные переходные процессы; дроссели отличаются значительными массой и габаритами, к тому же их индуктивность изменяется при изменении тока нагрузки. При коммутации сети (включении/отключении) или при скачкообразном изменении тока нагрузки возникают переходные процессы, способные вызвать перенапряжения и броски тока в элементах фильтра и выпрямителя. Даже при малой длительности такие процессы могут вывести из строя вентили выпрямителя, а также привести к пробою конденсаторов или повреждению изоляции дросселей и силового трансформатора.

Если требуется обеспечить коэффициент сглаживания выше 50, применяют многозвенные конструкции фильтров. На практике чаще всего используют двухзвенные схемы: они отличаются стабильностью коэффициента сглаживания при изменениях тока нагрузки, а также хорошими массогабаритными и энергетическими характеристиками. Применение трёх и более звеньев нежелательно, так как это сужает зону устойчивой работы и понижается КПД устройства.

В качестве программного обеспечения будем использовать Qucs-S.

Qucs предназначен для моделирования цифровых и аналоговых схем во временной и частотной областях от постоянного тока до СВЧ-частот [5].

В схемах генератор переменного тока будет имитировать вторичную обмотку трансформатора, далее электрический ток выпрямляется диодным мостом

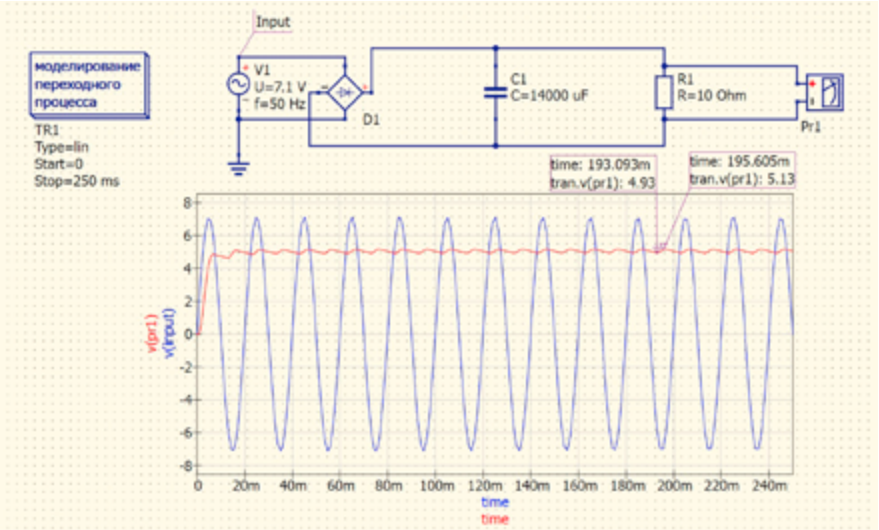



**Рисунок 2.** Моделирование емкостного сглаживающего фильтра
**Figure 2.** Simulation of a capacitive smoothing filter

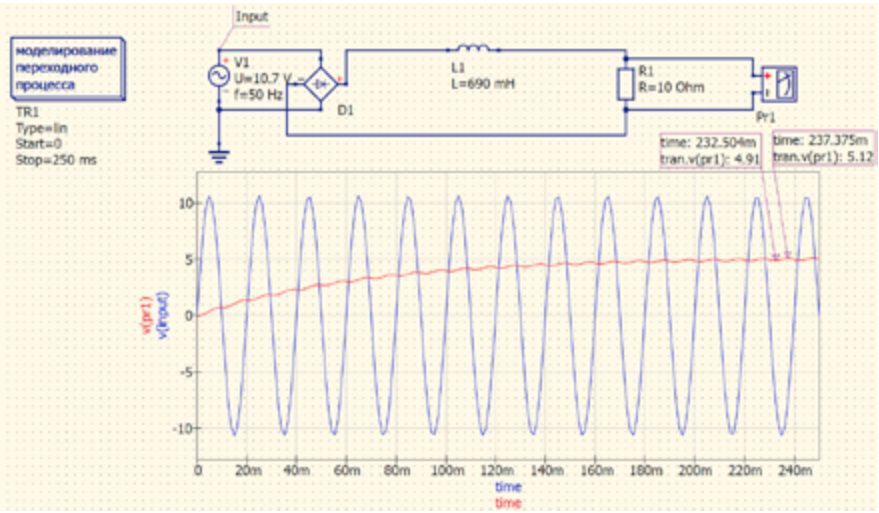



**Рисунок 3.** Моделирование индуктивного сглаживающего фильтра
**Figure 3.** Simulation of an inductive smoothing filter





KBPC1005, взятым из библиотеки элементов. После двухполупериодного выпрямителя частота пульсаций равняется удвоенной частоте сети, т. е. 100 Гц. Данный диодный мост выдерживает ток 3 А и напряжение 50 В. Нагрузка 10 Ом будет имитировать электронное устройство, которое мы будем питать напряжением 5 В, например, мобильный телефон.

Целью моделирования было получение амплитуды пульсаций не больше 0,1 В. Напряжение в среднем на нагрузке колебалось от 4,9 В до 5,1 В. Емкостной сглаживающий фильтр, состоящий из одного конденсатора, требует наименьшее напряжение из остальных фильтров для питания нагрузки. Оно равняется 7,1 В. Индуктивный фильтр подключён к напряжению 10,7 В, а комбинированный LC-фильтр — к 8,65 В. Следовательно на фильтрующей катушке индуктивности падает приличное напряжение. Фильтры, использующие дроссель, сильнее снижают напряжение источника, чем фильтр, состоящий из одного конденсатора.

В первом случае для достижения требуемой амплитуды пульсаций напряжения не более 0,1 В необходимо использовать конденсатор ёмкостью не менее 14 000 мкФ. Во втором случае — дроссель с индуктивностью не менее 690 мГн. Такие радиоэлементы обладают приличными размерами, а также имеют высокую стоимость. Комбинированный фильтр позволил ограничиться

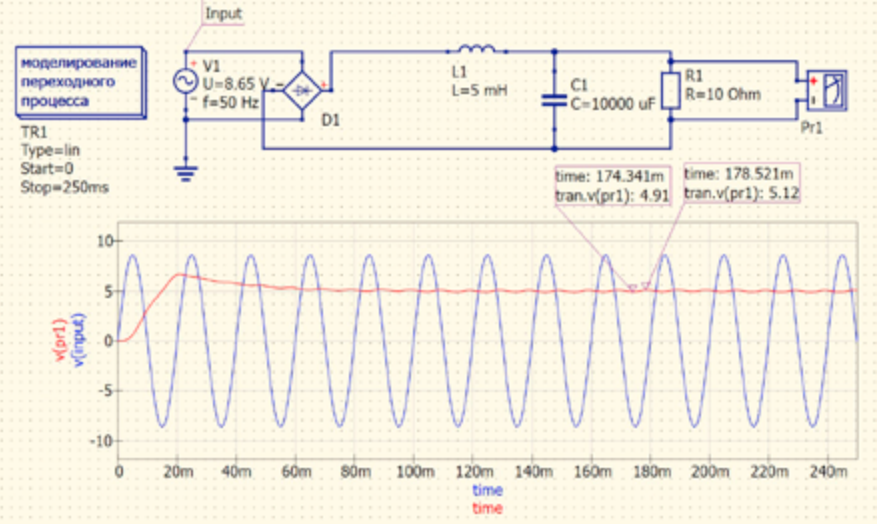



**Рисунок 4.** Моделирование индуктивно-ёмкостного сглаживающего фильтра
**Figure 4.** Simulation of an LC smoothing filter

дросселем с индуктивностью 5 мГн и конденсатором ёмкостью 10 000 мкФ. Элементы с такими параметрами стоят вместе дешевле и обладают небольшими размерами.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения данной работы был проведён сравнительный анализ трёх типов пассивных сглаживающих фильтров (ёмкостного, индуктивного и индуктивно-ёмкостного), предназначенных для использования в выпрямителях блоков питания с выходным напряжением 5 В. Моделирование электрических схем выполнялось в среде Qucs-S с использованием мостового выпрямителя и активной нагрузки 10 Ом, имитирующей потребление тока около 0,5 А.

Таким образом, на основе проведённого моделирования можно рекомендовать LC-фильтр в качестве оптимального для построения малогабаритных блоков питания на 5 В с допустимыми пульсациями.

## Список литературы

1. Пилипенко А. М. Основы теории четырехполюсников и электрических фильтров: учебное пособие / А. М. Пилипенко. Ростов-на-Дону, Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2019. 97 с.
2. Частотные электрические фильтры: научно-популярное издание / Д. А. Конашинский. Москва, Ленинград: Государственное энергетическое издательство, 1959. 128 с.
3. Гейтенко Е. Н. Источники вторичного электропитания. Схемотехника и расчет: учебное пособие / Е. Н. Гейтенко. Москва: СОЛОН-Пресс, 2021. 447 с.
4. Электропитание устройств и систем телекоммуникаций. Сборник примеров и задач: учебное пособие / Сажнев А. М., Рогулина Л. Г. Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2012.
5. Кузнецов В. Симулятор электронных схем с открытым исходным кодом Qucs: основные возможности и основы моделирования / В. Кузнецов // Компоненты и технологии. 2015. № 3 (164). С. 114–120.

## References

1. Pilipenko A. M. (2019) Fundamentals of the theory of four-terminal networks and electrical filters: textbook. Rostov-on-Don, Taganrog: Southern Federal University Publishing House. 97 p.
2. Konashinsky D. A. (1959) Frequency electrical filters: popular science edition. Moscow, Leningrad: State Energy Publishing House. 128 p.
3. Geitenko E. N. (2021) Secondary power sources. Circuit design and calculation: textbook. Moscow: SOLON-Press. 447 p.
4. Sazhnev A. M. and Rogulina L. G. (2012) Power supply of telecommunication devices and systems. Collection of examples and problems: textbook. Siberian State University of Telecommunications and Information Science.
5. Kuznetsov V. (2015) Open-source electronic circuit simulator Qucs: main features and basics of modeling, *Components and Technologies*, vol. 164, no. 3, pp. 114–120.

## Информация об авторах

**Рожков Алексей Иванович,** *студент, Калужский филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»; 248000, Россия, г. Калуга, ул. Университетский Городок, зд. 1/2; SPIN-код: 1712–0374; Author ID (РИНЦ): 1329340; e-mail: nauka-rozhkov@yandex.ru.*

**Никифоров Дмитрий Константинович,** *кандидат физико-математических наук, доцент кафедры проектирования и технологии производства электронных приборов, Калужский филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»; 248000, Россия, г. Калуга, ул. Университетский Городок, зд. 1/2; SPIN-код: 4248–8600; Author ID (RSCI): 161204; e-mail: dm_nikif@rambler.ru.*

## Information about the authors

**Rozhkov Alexey Ivanovich**, *student, Kaluga Branch of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Moscow State Technical University named after N. E. Bauman (National Research University)"; 1/2 Universitetsky Gorodok, Kaluga, 248000, Russia; SPIN-code: 1712–0374; Author ID (RSCI): 1329340; e-mail: nauka-rozhkov@yandex.ru.*

**Nikiforov Dmitry Konstantinovich**, *PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor at the Department of Design and Technology of Production of Electronic Devices, Kaluga Branch of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Moscow State Technical University named after N. E. Bauman (National Research University)"; 1/2 Universitetsky Gorodok, Kaluga, 248000, Russia; SPIN-code: 4248–8600; Author ID (RSCI): 161204; e-mail: dm_nikif@rambler.ru.*