

УДК 621.3.049.75

DOI: [10.26102/2310-6018/2026.60.9.004](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2026.60.9.004)

Анализ переходных процессов и оптимизация параметров выходных LC-фильтров импульсных источников питания

С.У. Увайсов, В.В. Черноверская✉, Д.Е. Степанова, Г.А. Литвиненко

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Российская Федерация

Резюме. В статье приведены результаты исследования, посвященного анализу переходных процессов в импульсных источниках питания и оптимизации параметров выходных LC-фильтров. Актуальность исследования обусловлена широким внедрением импульсных преобразователей в современной электронной аппаратуре, что требует детального изучения возникающих в них переходных процессов, при которых в моменты включения и выключения возникают кратковременные перенапряжения (выбросы), подчас приводящие к неисправности устройства. Традиционный расчет фильтров в установившемся режиме не всегда учитывает динамические перегрузки, поскольку требует применения современных средств автоматизированного проектирования для уточнения характеристик устройства. Цель исследования – разработка методики моделирования электрических режимов узлов питания для определения оптимальных номиналов элементов LC-фильтров, обеспечивающих заданные пульсации выходного напряжения и исключающие опасные переходные процессы. Для достижения поставленной цели были проведены численные эксперименты, базирующиеся на методах схемотехнического моделирования. В основе предложенного подхода лежит комплексный анализ переходных характеристик при варьировании параметров реактивных элементов фильтра. По результатам моделирования было получено семейство графиков, отражающих зависимость амплитуды перенапряжения и размаха пульсаций выходного напряжения от номиналов индуктивностей и емкостей. Это позволило определить оптимальные значения LC-фильтра платы питания, обеспечивающие плавное нарастание (без выбросов) выходного напряжения при включении устройства. Практическая значимость работы заключается в возможности применения представленной методики на этапе проектирования для повышения надежности радиоэлектронной аппаратуры и сокращения сроков отладки прототипа. Полученные данные подтверждают эффективность использования встроенных средств моделирования Altium Designer для предотвращения аварийных режимов работы источников питания.

Ключевые слова: радиоэлектронное устройство, печатная плата, LC-фильтр, импульсный источник питания, схема электрическая, моделирование, переходный процесс, пульсации напряжения.

Для цитирования: Увайсов С.У., Черноверская В.В., Степанова Д.Е., Литвиненко Г.А. Анализ переходных процессов и оптимизация параметров выходных LC-фильтров импульсных источников питания. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2026;14(9). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/article?id=2490> DOI: 10.26102/2310-6018/2026.60.9.004

Transient analysis and optimization of output LC filters of switching power supplies

S.U. Uvaisov, V.V. Chernoverskaya✉, D.E. Stepanova, G.A. Litvinenko

MIREA – Russian Technological University, Moscow, the Russian Federation

Abstract. The article presents the results of a study focused on the analysis of transient processes in switching power supplies and the optimization of output LC filter parameters. The relevance of the study is driven by the widespread integration of switching converters into modern equipment, which

necessitates a detailed investigation of transients. During these processes, short-term overvoltages (spikes) occur during power-on and power-off cycles, potentially leading to device failure. Conventional filter calculations based on steady-state operation do not always account for dynamic overloads, requiring the use of modern computer-aided design (CAD) tools to refine device characteristics. The aim of the work is to develop a methodology for modeling the electrical modes of power supply units within the Altium Designer environment to select optimal LC filter component values that ensure target output voltage ripple levels and eliminate hazardous transients. During the study, numerical experiments based on circuit simulation methods were conducted. The proposed approach is centered on a comprehensive analysis of transient characteristics while varying the parameters of the filter's reactive elements. The simulation results yielded a family of graphs reflecting the dependence of overvoltage amplitude and output voltage ripple peak-to-peak values on inductance and capacitance ratings. Consequently, optimal LC filter values for the power supply board were determined, ensuring a smooth rise of the output voltage (without spikes) during power-up. The practical significance of the work lies in the applicability of the presented methodology at the design stage to enhance the reliability of electronic equipment and reduce prototype debugging time. The obtained data confirm the effectiveness of using Altium Designer's built-in simulation tools to prevent emergency operating modes in power supplies.

Keywords: radio-electronic device, printed circuit board, LC filter, switching power supply, electrical circuit, simulation, transient process, voltage ripple.

For citation: Uvaisov S.U., Chernoverskaya V.V., Stepanova D.E., Litvinenko G.A. Transient analysis and optimization of output LC filters of switching power supplies. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2026;14(9). (In Russ.). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/article?id=2490>
DOI: 10.26102/2310-6018/2026.60.9.004

Введение

В современных реализациях схем низковольтного электропитания разработчики радиоэлектронной аппаратуры часто применяют преобразователи DC-DC (преобразователи постоянного тока). Это объясняется их высоким коэффициентом полезного действия (КПД) (75...85 %) по сравнению с линейными стабилизаторами выходного напряжения, у которых КПД составляет 30...40 % [1].

Стабилизатор выходного напряжения, в электрической схеме которого присутствуют преобразователи DC-DC, как правило, обладает меньшими массогабаритными характеристиками, поскольку работает в менее нагруженном температурном режиме и не требует дополнительных элементов теплоотведения и охлаждения. Номенклатура современных преобразователей DC-DC представлена широким ассортиментом изделий с различными диапазонами входного и выходного напряжений. Однако при всех преимуществах у преобразователей DC-DC есть недостаток: высокий размах пульсаций выходного напряжения, который может достигать 1 % от выходного напряжения. Как правило, пульсации выходного напряжения преобразователя DC-DC не влияют на работу схем, в которых используются цифровые микросхемы [2, 3].

Для устройств с аналоговыми микросхемами размах пульсаций напряжения источника питания, не должен превышать 5 мВ (в некоторых случаях – еще меньше). Для уменьшения пульсаций выходного напряжения преобразователей DC-DC целесообразно использовать LC-фильтр нижних частот, подключенный к выходу преобразователя [4].

Материалы и методы

В рамках исследования решалась задача повышения надежности узла питания посредством определения оптимальных численных значений параметров LC-фильтров,

обеспечивающих пульсации выходного напряжения в допустимом диапазоне и исключая опасные переходные процессы в электрической схеме. При решении поставленной задачи осуществлялось схемотехническое проектирование исследуемого устройства, проводились численные эксперименты и анализ переходных характеристик. На Рисунке 1 приведена схема электрическая принципиальная платы электропитания с преобразователем DC-DC (TEN 20-2412WIN), на выходе которого подключен LC-фильтр [5].

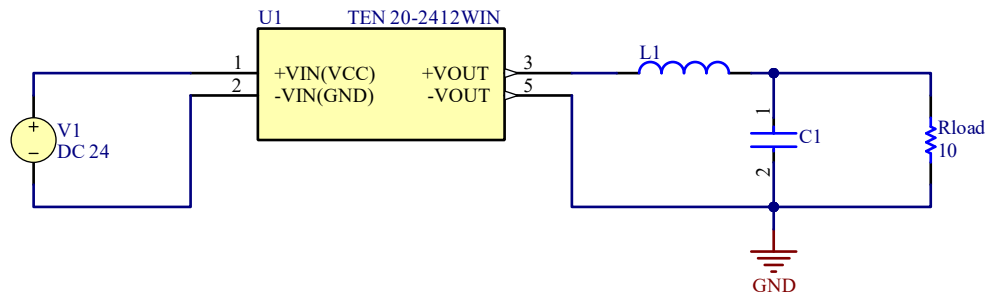


Рисунок 1 – Плата электропитания. Схема электрическая принципиальная
Figure 1 – Power supply board. Electrical schematic diagram

На вход преобразователя подается напряжение постоянного тока +24 В.

Параметры устройства:

- выходное напряжение: 12 В;
- частота преобразования: 400 кГц;
- размах пульсаций выходного напряжения: 80 мВ.

Нагрузкой модуля питания является резистор $R_{load} = 10 \text{ Ом}$, что соответствует выходному току преобразователя 1,2 А.

В ходе схемотехнического моделирования исследовалась возможность уменьшения размаха пульсаций модуля питания с 80 мВ до значения, не превышающего 5 мВ с помощью LC-фильтра.

Модуль преобразователя DC-DC TEN 20-2412WIN имеет стабильное выходное напряжение +12 В, поэтому, на первый взгляд, допустимо применение конденсатора C1 с номинальным напряжением 16 В, поскольку запас по напряжению составляет 33 %. Однако в LC-фильтрах в момент включения/выключения питания возможны переходные процессы колебательного характера, при которых максимальный выброс напряжения может в несколько раз превышать номинальное значение. Это может привести к выходу из строя как элементов самого LC-фильтра, так и компонентов нагрузки, на которые подается электропитание [6, 7]. В связи с этим было решено провести схемотехническое моделирование и вычислительный эксперимент для оценки переходных процессов при различных значениях LC-фильтра [8].

Моделирование электрических режимов проводилось с использованием САПР Altium Designer. Исходная схема была дополнена на входе источником питания (источник входного сигнала), а на выходе – нагрузкой (сопротивление нагрузки R_{load}).

Модуль электропитания TEN 20-2412WIN заменен двумя последовательно соединенными источниками напряжения V1.1 и V1.2 (Рисунок 2).

Источник напряжения V1.1 имитирует пульсации выходного напряжения модуля электропитания. Параметры источника напряжения V1.1:

- тип входного воздействия – Синусоидальный (Stimulus Type – Sinusoidal);
- амплитуда – 0,04 В (Amplitude – 0.04 V);
- частота – 400 кГц (Frequency – 400 kHz).

Источник напряжения V1.2 имитирует момент включения модуля электропитания. Параметры источника напряжения V1.2:

- тип входного воздействия – Импульс (Stimulus Type – Pulse);
- значение постоянной составляющей – 0 В (DC Magnitude – 0 V);
- амплитуда импульса – 12 В (Pulse Value – 12 V);
- длительность импульса – 10 мс (Pulse width – 10 ms) [9, 10].

В ходе моделирования измерялось напряжение в узле соединения нагрузки R_{load} и конденсатора C1. Измерение переходных процессов осуществлялось на нагрузке R_{load} относительно GND.

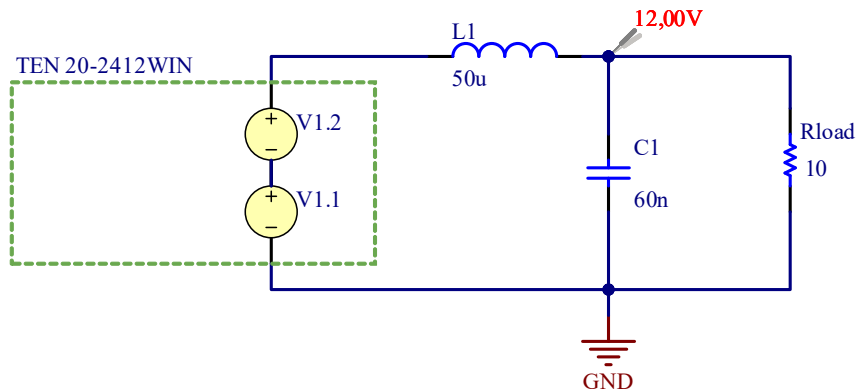


Рисунок 2 – Модифицированная электрическая схема платы электропитания
Figure 2 – Modified electrical circuit diagram of the power supply board

После настройки параметров переходных процессов в модуле Simulate проведена симуляция момента включения модуля электропитания. При начальных значениях индуктивности $L1 = 1$ мкГн и емкости $C1 = 3000$ нФ (3 мкФ) измерялись характеристики переходного процесса и размах пульсаций выходного напряжения в установившемся режиме [1, 11]. Результаты исследования приведены на Рисунках 3 и 4.

1. При $L1 = 1$ мкГн и $C1 = 3000$ нФ

Во вкладке Transient Analysis построен график переходных процессов.

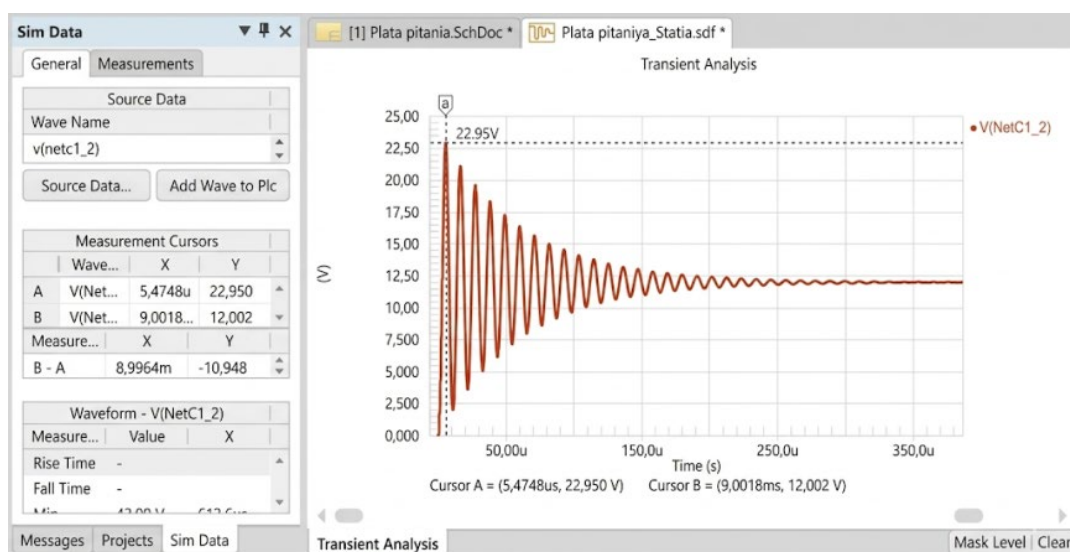


Рисунок 3 – График переходных процессов выходного напряжения при $L1 = 1$ мкГн и $C1 = 3000$ нФ

Figure 3 – Graph of output voltage transients at $L1 = 1$ μ H and $C1 = 3000$ nF

Используя штатные инструменты исследования электрических параметров, встроенные в САПР Altium Designer, была определена максимальная амплитуда напряжения переходного процесса $U_{\max \text{ перех.процесса}} = 22,95 \text{ В}$.

Далее, исследуя графики для установившегося режима, определили размах пульсаций выходного напряжения, который составил $U_{\text{пульс}} = 4,39 \text{ мВ}$. На Рисунке 4 приведен скриншот вкладки Sim Data с зафиксированными значениями исследуемых показателей.

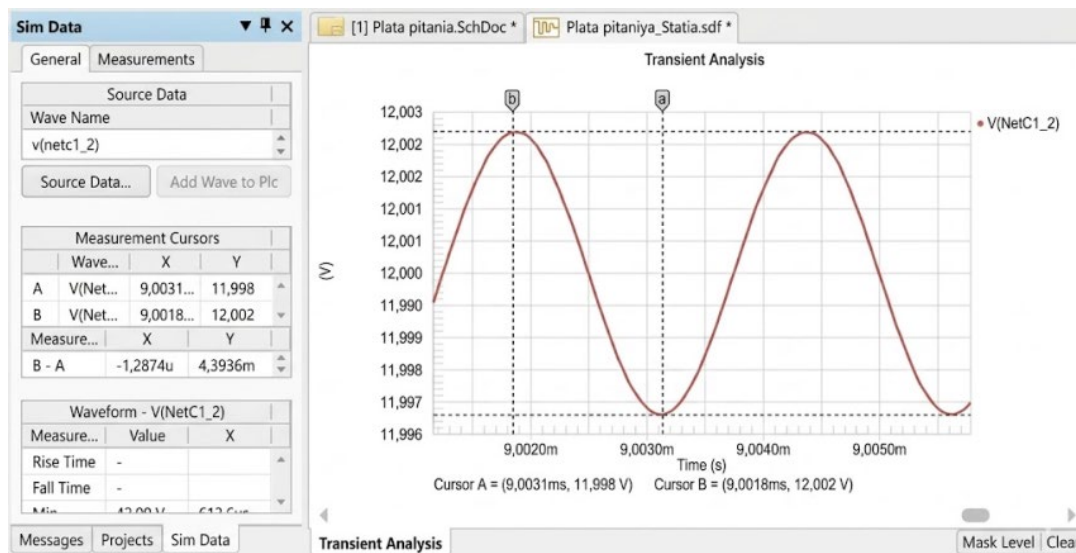


Рисунок 4 – Размах пульсаций выходного напряжения при $L1 = 1 \text{ мкГн}$ и $C1 = 3000 \text{ нФ}$
Figure 4 – Output voltage ripple swing at $L1 = 1 \text{ }\mu\text{H}$ and $C1 = 3000 \text{ nF}$

Для детального анализа динамики переходного процесса и пульсаций выходного напряжения была проведена серия из 10 модельных экспериментов с различными значениями индуктивности $L1$ и емкости $C1$. Опираясь на теоретические положения из области разработки LC-фильтров, в проводимых исследованиях было решено последовательно увеличивать значение индуктивности $L1$ с одновременным снижением емкости $C1$, что позволило бы постепенно изменить характер переходного процесса с колебательного на апериодический и снизить амплитуду выброса напряжения до заданного значения $U = 12 \text{ В}$. Результаты моделирования и графики приведены на Рисунках 5–13.

2. При $L1 = 2 \text{ мкГн}$ и $C1 = 2000 \text{ нФ}$

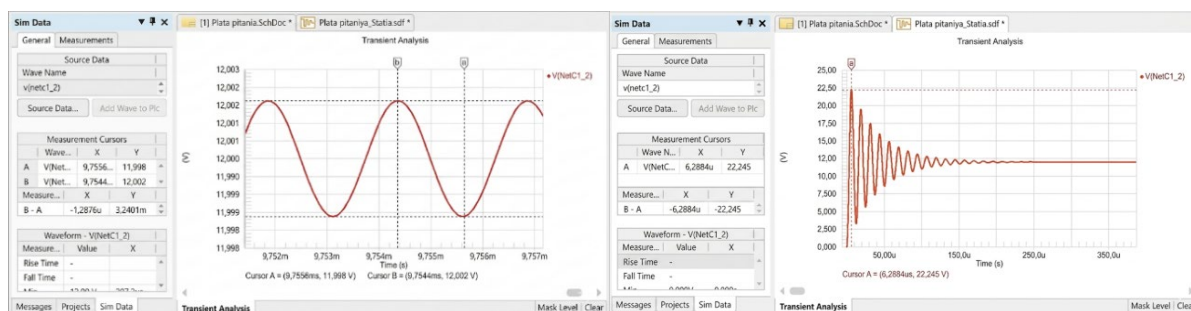


Рисунок 5 – Графики переходных процессов пульсаций и выходного напряжения при $L1 = 2 \text{ мкГн}$ и $C1 = 2000 \text{ нФ}$

Figure 5 – Graphs of transient processes of pulsations and output voltage at $L1 = 2 \text{ }\mu\text{H}$ and $C1 = 2000 \text{ nF}$

Максимальная амплитуда напряжения в переходном процессе равна $U_{\text{мах перх.процесса}} = 22,25 \text{ В}$, амплитуда пульсаций $U_{\text{пульс}} = 3,24 \text{ мВ}$.

3. При $L1 = 4 \text{ мкГн}$ и $C1 = 1000 \text{ нФ}$

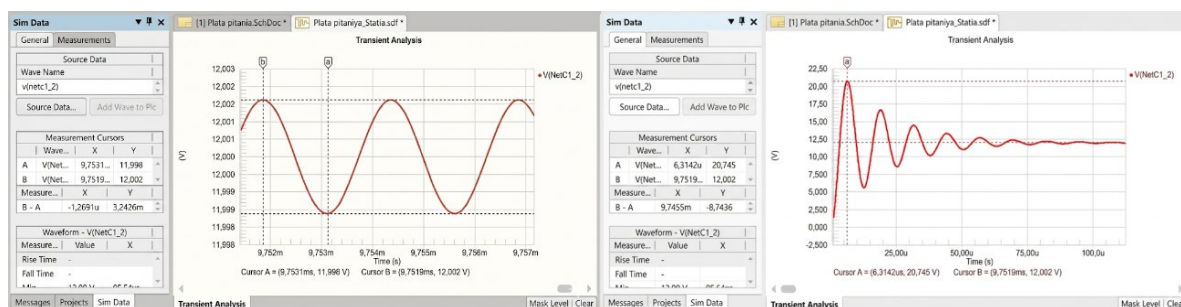


Рисунок 6 – Графики переходных процессов пульсаций и выходного напряжения при $L1 = 4 \text{ мкГн}$ и $C1 = 1000 \text{ нФ}$

Figure 6 – Graphs of transient processes of pulsations and output voltage at $L1 = 4 \text{ мкГн}$ and $C1 = 1000 \text{ нФ}$

Исходя из графиков, максимальное напряжение переходного процесса равно $U_{\text{мах перх.процесса}} = 20,75 \text{ В}$, а амплитуда пульсаций $U_{\text{пульс}} = 3,24 \text{ мВ}$.

4. При $L1 = 6 \text{ мкГн}$ и $C1 = 700 \text{ нФ}$

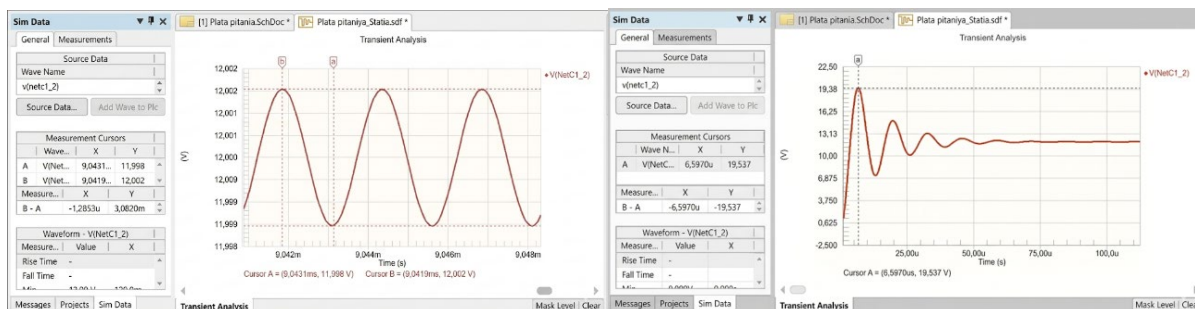


Рисунок 7 – Графики переходных процессов пульсаций и выходного напряжения при $L1 = 6 \text{ мкГн}$ и $C1 = 700 \text{ нФ}$

Figure 7 – Graphs of transient processes of pulsations and output voltage at $L1 = 6 \text{ мкГн}$ and $C1 = 700 \text{ нФ}$

Максимальная амплитуда напряжения в переходном процессе $U_{\text{мах перх.процесса}} = 19,54 \text{ В}$, амплитуда пульсаций $U_{\text{пульс}} = 3,08 \text{ мВ}$.

5. При $L1 = 8 \text{ мкГн}$ и $C1 = 500 \text{ нФ}$

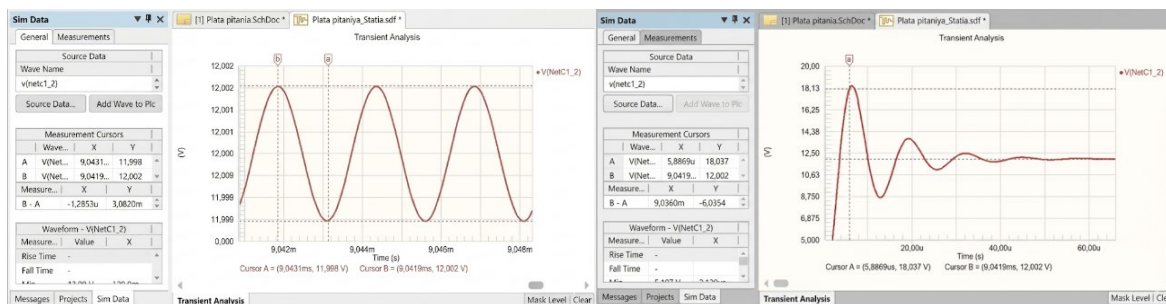


Рисунок 8 – Графики переходных процессов пульсаций и выходного напряжения при $L1 = 8 \text{ мкГн}$ и $C1 = 500 \text{ нФ}$

Figure 8 – Graphs of transient processes of pulsations and output voltage at $L1 = 8 \text{ мкГн}$ and $C1 = 500 \text{ нФ}$

Максимальная амплитуда напряжения в переходном процессе $U_{\max}$ перех.процесса = 18,04 В, амплитуда пульсаций $U_{\text{пульс}} = 3,23$ мВ.

6. При $L1 = 10$ мкГн и $C1 = 300$ нФ

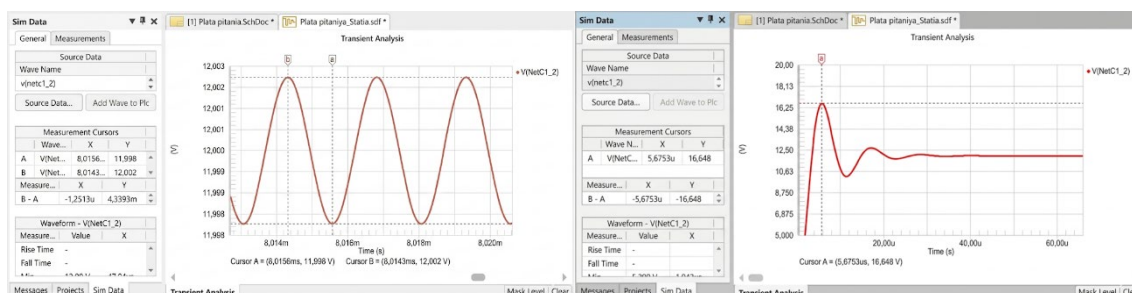


Рисунок 9 – Графики переходных процессов пульсаций и выходного напряжения при $L1 = 10$ мкГн и $C1 = 300$ нФ

Figure 9 – Graphs of transient processes of pulsations and output voltage at $L1 = 10$ μH and $C1 = 300$ nF

Максимальная амплитуда напряжения в переходном процессе $U_{\max}$ перех.процесса = 16,65 В, амплитуда пульсаций $U_{\text{пульс}} = 4,34$ мВ.

7. При $L1 = 20$ мкГн и $C1 = 200$ нФ

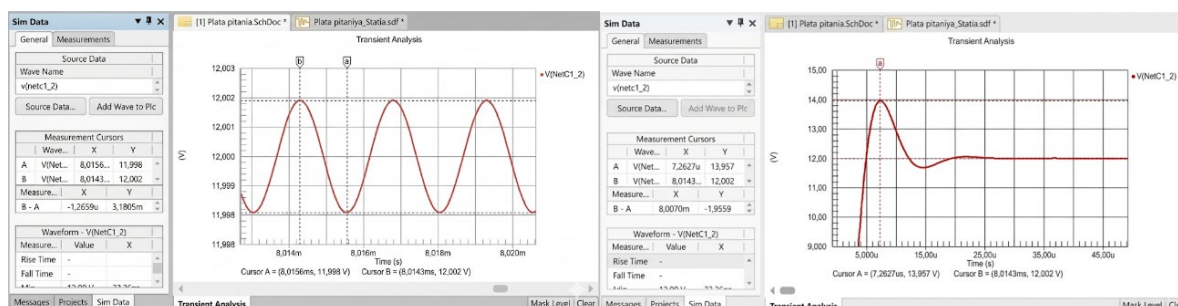


Рисунок 10 – Графики переходных процессов пульсаций и выходного напряжения при $L1 = 20$ мкГн и $C1 = 200$ нФ

Figure 10 – Graphs of transient processes of pulsations and output voltage at $L1 = 20$ μH and $C1 = 200$ nF

Максимальная амплитуда напряжения в переходном процессе $U_{\max}$ перех.процесса = 13,95 В, амплитуда пульсаций $U_{\text{пульс}} = 3,18$ мВ.

8. При $L1 = 30$ мкГн и $C1 = 130$ нФ

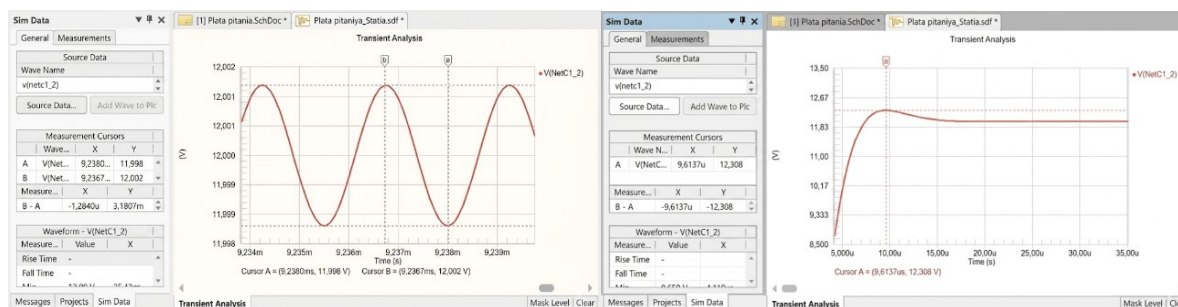


Рисунок 11 – Графики переходных процессов пульсаций и выходного напряжения при $L1 = 30$ мкГн и $C1 = 130$ нФ

Figure 11 – Graphs of transient processes of pulsations and output voltage at $L1 = 30$ μH and $C1 = 130$ nF

Максимальная амплитуда напряжения в переходном процессе $U_{\max \text{ перех.процесса}} = 12,31 \text{ В}$, амплитуду пульсаций $U_{\text{пульс}} = 3,18 \text{ мВ}$.

9. При $L1 = 40 \text{ мкГн}$ и $C1 = 100 \text{ нФ}$

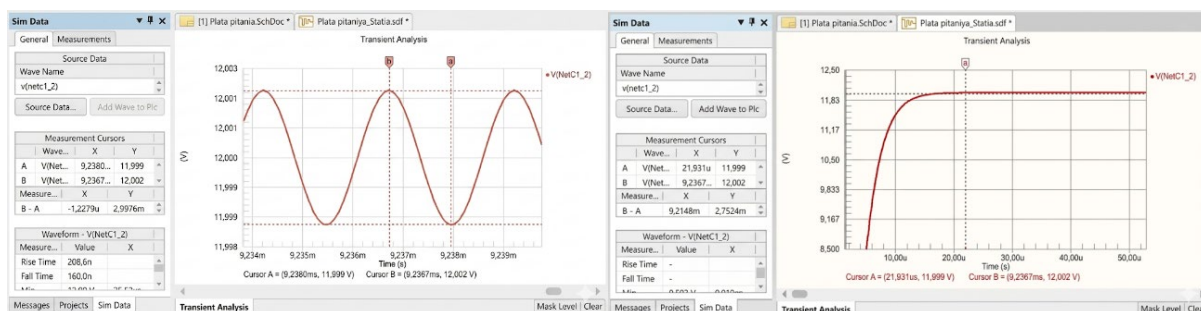


Рисунок 12 – Графики переходных процессов пульсаций и выходного напряжения при $L1 = 40 \text{ мкГн}$ и $C1 = 100 \text{ нФ}$

Figure 12 – Graphs of transient processes of pulsations and output voltage at $L1 = 40 \text{ μH}$ and $C1 = 100 \text{ nF}$

Максимальная амплитуда напряжения в переходном процессе $U_{\max \text{ перех.процесса}} = 11,99 \text{ В}$, амплитуда пульсаций $U_{\text{пульс}} = 2,99 \text{ мВ}$.

10. При $L1 = 50 \text{ мкГн}$ и $C1 = 60 \text{ нФ}$

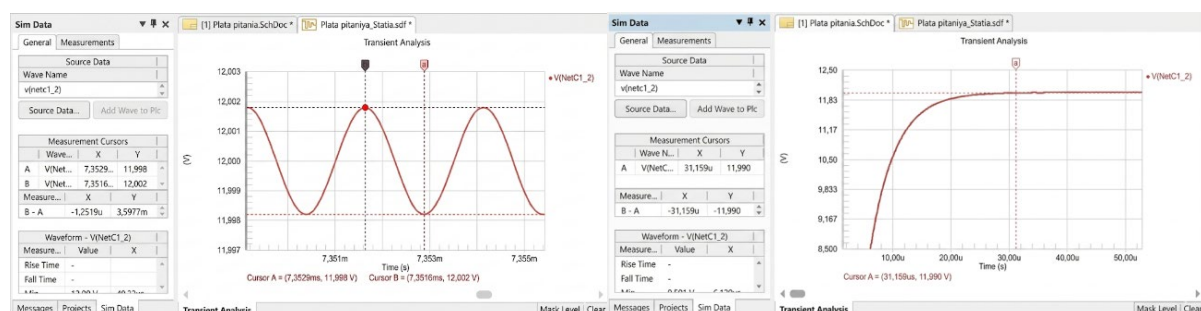


Рисунок 13 – Графики переходных процессов пульсаций и выходного напряжения при $L1 = 50 \text{ мкГн}$ и $C1 = 60 \text{ нФ}$

Figure 13 – Graphs of transient processes of pulsations and output voltage at $L1 = 50 \text{ μH}$ and $C1 = 60 \text{ nF}$

Максимальная амплитуда напряжения в переходном процессе $U_{\max \text{ перех.процесса}} = 11,99 \text{ В}$, амплитуда пульсаций $U_{\text{пульс}} = 3,59 \text{ мВ}$.

Результаты и обсуждение

Для наглядности результаты модельных экспериментов сведены в Таблицу 1.

Результаты проведенных исследований показали, что постепенное увеличение значений индуктивности $L1$ с одновременным снижением емкости $C1$ позволяют перевести колебательный характер переходного процесса в апериодический монотонный процесс. Это прослеживается во всех 10-ти проведенных исследованиях. Увеличение индуктивности позволяет снизить амплитуду выброса за счет снижения скорости изменения тока и напряжения, тем самым демпфируя колебания. При этом напряжение переходного процесса постепенно снижается с $U = 22,95 \text{ В}$ до номинального значения $U = 11,99 \text{ В}$, достигнутого в 9-м исследовании. В свою очередь, снижение емкости $C1$ позволяет сократить время t переходного процесса. Из исследований видно, что снижение емкости с 3000 до 300 нФ (на один порядок) пропорционально сократило

время переходного процесса с 300 до 30 мкс. Меньшая емкость быстрее заряжается, но имеет большее реактивное сопротивление X_C , что может усилить выброс. Эта ситуация иллюстрируется исследованиями 9 и 10, где при достигнутом номинальном значении напряжения $U = 11,99$ В и очередном снижении емкости со 100 до 60 нФ наблюдается увеличение амплитуды пульсаций напряжения $U_{\text{пульс}}$ с 2,99 мВ до 3,59 мВ и увеличение длительности переходного процесса с 20 до 30 мкс.

Таблица 1 – Характер переходных процессов, значения выбросов и пульсации выходного напряжения при разных номиналах LC-фильтра

Table 1 – Nature of transient processes, overvoltage spikes, and output voltage ripple values at various LC filter ratings

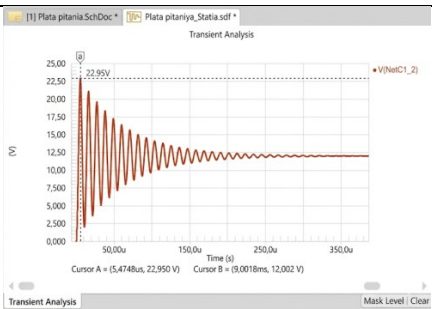
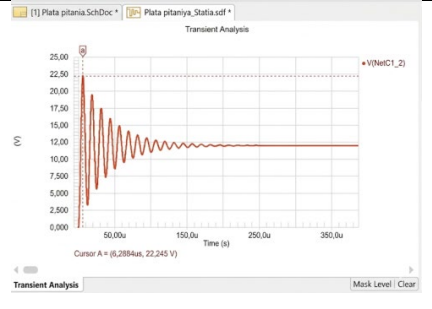
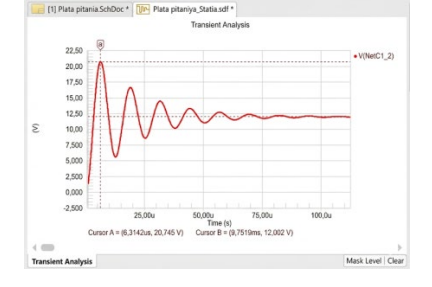
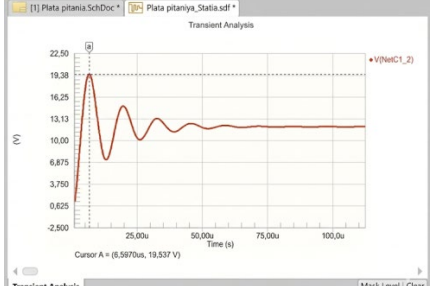
№ п/п	L1, мкГн	C1, нФ	U_{max} перех.процесса, В	$U_{\text{пульс}}$, мВ	Вид переходного процесса
1	1	3000	22,95	4,39	
2	2	2000	22,25	3,24	
3	4	1000	20,75	3,24	
4	6	700	19,54	3,08	

Таблица 1 (продолжение)
Table 1 (continued)

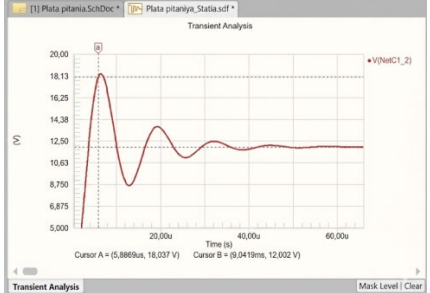
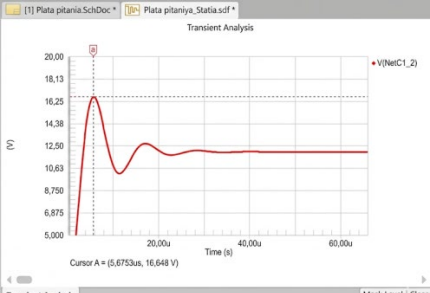
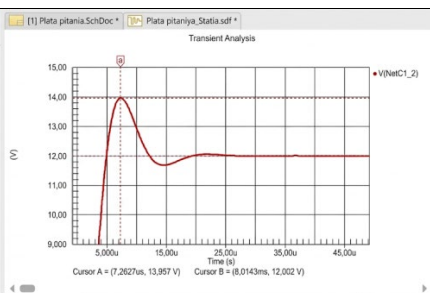
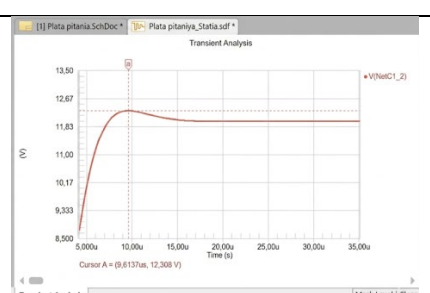
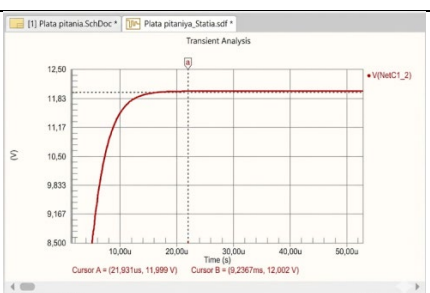
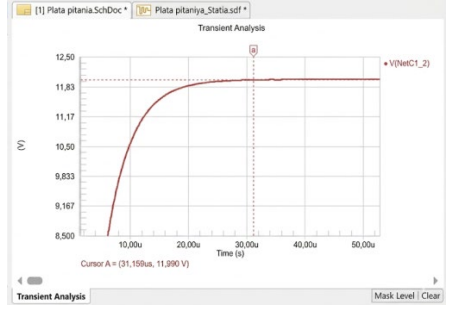
5	8	500	18,04	3,23	
6	10	300	16,65	4,34	
7	20	200	13,95	3,18	
8	30	130	12,31	3,18	
9	40	100	11,99	2,99	

Таблица 1 (продолжение)
Table 1 (continued)

10	50	60	11,99	3,59	
----	----	----	-------	------	--

Чтобы полностью исключить выбросы напряжения (когда перерегулирование равно нулю) в момент пуска, переходный процесс должен быть строго апериодическим.

Передаточная функция нагруженного LC-фильтра с учетом сопротивления нагрузки R_H (принимая во внимание идеализированный случай, когда $R_L = 0$ и $R_C = 0$) может быть представлена в виде уравнения:

$$s^2 + \frac{1}{R_H C} s + \frac{1}{LC} = 0. \quad (1)$$

Коэффициент демпфирования системы σ определяется из соотношения:

$$\sigma = \frac{1}{2R_H} \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (2)$$

Минимальное время переходного процесса при отсутствии перерегулирования достигается в граничном режиме затухания, когда:

$$\sigma = 1 \text{ или } \frac{1}{2R_H} \sqrt{\frac{L}{C}} = 1,$$

тогда волновое сопротивление контура будет определяться из соотношения:

$$\sqrt{\frac{L}{C}} = 2R_H, \quad (3)$$

т. е. оно должно быть строго равно удвоенному сопротивлению нагрузки в режиме пуска.

Проанализировав эти зависимости и сопоставив их с результатами проведенных исследований, можно сделать вывод, что оптимальными параметрами LC-фильтра являются значения, полученные в исследовании 9: $L = 40$ мкГн, $C = 100$ нФ. Эти значения удовлетворяют всем аналитическим выражениям: обеспечивают коэффициент демпфирования, равный единице ($\sigma = 1$), отсутствие перерегулирования ($U = 11,99$ В), размах пульсаций $U_{\text{пульс}} = 2,99$ мВ (не превышает значения 5 мВ), строго апериодический характер переходного процесса с минимальной длительностью $t = 20$ мкс.

Заключение

Результаты проведенного исследования позволили определить номинальные значения LC-фильтра, при которых размах пульсаций выходного напряжения не превышает 5 мВ.

Исследования 1–8 имеют колебательный характер переходного процесса с выбросом напряжения, превышающим номинальное значение выходного напряжения 12 В. Если остановиться на одном из этих вариантов, то следует учесть, что номинальное значение напряжения конденсатора $C1$ должно быть больше, чем выброс напряжения

переходного процесса.

Исследования 9, 10 имеют плавно возрастающий характер переходных процессов, без выбросов напряжения. Такой характер переходных процессов наиболее желателен. Значения параметров, полученные в исследовании 9 позволили обеспечить минимально возможное время переходного процесса (20 мкс) для достижения номинального напряжения, равного 12 В. Проведенные исследования показали соответствие результатов модельных экспериментов теоретическим аспектам проектирования LC-фильтров и эффективности применения таких исследований с использованием специализированных САПР для повышения надежности радиоэлектронной аппаратуры и сокращения сроков отладки прототипа.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Шабалин Н.Г., Феоктистов В.П., Иньков Ю.М. Индуктивно-конденсаторные импульсные преобразователи напряжения постоянного тока. *Электротехника*. 2011;(8):33–36.
2. Нгуен Д.Х. Диагностирование неисправностей аналоговых радиоэлектронных устройств методом отжига. *Мехатроника, автоматика и робототехника*. 2024;(13):172–174. <https://doi.org/10.26160/2541-8637-2024-13-172-174>
Nguyen D.H. Diagnosis of faults in analog radio electronic devices by simulated annealing method. *Mechatronics, Automation, and Robotics*. 2024;(13):172–174. (In Russ.). <https://doi.org/10.26160/2541-8637-2024-13-172-174>
3. Дмитриков В.Ф., Самылин И.Н., Шушпанов Д.В. и др. Исследование пульсаций выходного напряжения транзисторного преобразователя понижающего типа. *Физика волновых процессов и радиотехнические системы*. 2007;10(2):86–93.
Dmitrikov V.F., Samylin I.N., Shushpanov D.V., et al. Investigations of output voltage ripples of transistor buck converter. *Physics of Wave Processes and Radio Systems*. 2007;10(2):86–93. (In Russ.).
4. Царенко А.И., Серегин Д.А. Развитие схмотехники DC/DC-преобразователей с закрытым входом. *Вестник Московского энергетического института*. 2008;(4):60–65.
Tsarenko A.I., Serioigin D.A. Circuitry development of closed-input DC/DC converters. *Bulletin of Moscow Power Engineering Institute*. 2008;(4):60–65. (In Russ.).
5. Фогель А.Л., Гуляев В.В. Импульсные преобразователи напряжения для вторичных источников питания. *Железнодорожный транспорт*. 2025;(12):36–37.
Fogel A.L., Gulyaev V.V. Pulse voltage converters for secondary power supplies. *Railway Transport*. 2025;(12):36–37. (In Russ.).
6. Барегамян Г., Маргарян В. Выбор параметров LC-фильтра инвертора с широтно-импульсной модуляцией и синусоидальным выходным напряжением. *Силовая электроника*. 2011;1(29):50–56.
7. Голубев В.В. Расчет и оптимизация выходного LC-фильтра импульсного преобразователя переменного напряжения. *Техническая электродинамика*. 2012;(1):33–37.
Golubev V.V. Calculation and optimization of the LC-filter of the pulse converter of a AC voltage. *Technical Electrodynamics*. 2012;(1):33–37. (In Ukrainian).
8. Erickson R.W., Maksimović D. *Fundamentals of Power Electronics*. Cham: Springer; 2020. 1084 p.
9. Kazimierczuk M.K. *Pulse-width Modulated DC-DC Power Converters*. Chichester: John Wiley & Sons; 2015. 960 p.

10. Mohan N., Undeland T.M., Robbins W.P. *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*. Hoboken: John Wiley & Sons; 2003. 802 p.
11. Rashid M.H. *Power Electronics: Devices, Circuits, and Applications*. Pearson; 2013. 1024 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Увайсов Сайгид Увайсович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой конструирования и производства радиоэлектронных средств Института радиоэлектроники и информатики, МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Российская Федерация.

e-mail: uvajsov@mirea.ru

ORCID: [0000-0003-1943-6819](https://orcid.org/0000-0003-1943-6819)

Saygid U. Uvaysov, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of Design and Production of Radioelectronic Devices of the Institute of Radio Electronics and Computer Science, MIREA – Russian Technological University, Moscow, the Russian Federation.

Черновверская Виктория Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств Института радиоэлектроники и информатики, МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Российская Федерация.

e-mail: chernoverskaya@mirea.ru

ORCID: [0009-0009-6311-7648](https://orcid.org/0009-0009-6311-7648)

Victoria V. Chernoverskaya, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor at the Department of Design and Production of Radioelectronic Devices of the Institute of Radio Electronics and Computer Science, MIREA – Russian Technological University, Moscow, the Russian Federation.

Степанова Дарья Евгеньевна, аспирант кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств Института радиоэлектроники и информатики, МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Российская Федерация.

e-mail: magistracy_dasha@bk.ru

Daria E. Stepanova, Postgraduate at the Department of Design and Production of Radioelectronic Devices of the Institute of Radio Electronics and Computer Science, MIREA – Russian Technological University, Moscow, the Russian Federation.

Литвиненко Глеб Анатольевич, аспирант кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств Института радиоэлектроники и информатики, МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Российская Федерация.

e-mail: gleb3012123@gmail.com

Gleb A. Litvinenko, Postgraduate at the Department of Design and Production of Radioelectronic Devices of the Institute of Radio Electronics and Computer Science, MIREA – Russian Technological University, Moscow, the Russian Federation.

Статья поступила в редакцию 10.06.2026; одобрена после рецензирования 25.08.2026; принята к публикации 11.09.2026.

The article was submitted 10.06.2026; approved after reviewing 25.08.2026; accepted for publication 11.09.2026.