

ОПТИМИЗАЦИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В УСИЛИТЕЛЯХ, РАБОТАЮЩИХ НА ЕМКОСТНУЮ НАГРУЗКУ

OPTIMIZATION OF TRANSIENT PROCESSES IN AMPLIFIERS OPERATING ON A CAPACITIVE LOAD

В статье приведены примеры расчета и моделирования усилителей, работающих на емкостную нагрузку. Показано как поэтапно найти такое соотношение между параметрами элементов, чтобы получить минимальное время переходных процессов на выходе усилителя.

Abstract- The article provides examples of calculation and simulation of amplifiers operating on a capacitive load. It is shown how to gradually find such a relationship between the parameters of the elements in order to obtain the minimum transient time at the amplifier output.

В. Макаренко

V. Makarenko

Операционные усилители (ОУ) часто выполняют различные системные функции, в которых усилитель должен реагировать на изменение сигналов на входе или изменение нагрузки на выходе. В большинстве случаев нагрузка подключается непосредственно к выходу ОУ и время отклика на входное воздействие во многом определяется характеристиками самого ОУ.

В схемах, где выходное напряжение напрямую не подается на нагрузку, отклик может существенно отличаться от входного воздействия. Типичным примером такого случая является работа ОУ на емкостную нагрузку. В таких схемах между выходом ОУ и емкостной нагрузкой подключается постоянный резистор и используется две ветви обратной связи.

На рис. 1 показан пример схемы, используемой для управления емкостной нагрузкой. Вход ОУ напрямую подключен к источнику напряжения, и усилитель должен реагировать на изменения, происходящие на входе. Например, входной сигнал ОУ это двухполярный сигнала датчика, а выход усилителя нагружен на кабель с емкостью 10 нФ.

При указанных на рис. 1 номиналах переходной процесс длится примерно 2 мкс, как показано на рис. 2. Можно ли сократить время переходного процесса, насколько точно передается входной сигнал на выход, как зависят эти параметры от соотношения параметров элементов, можно определить достаточно просто с помощью моделирования в Multisim.

Из рис. 1 следует, что параметры схемы определяют три элемента (если принять, что ОУ используется один и тот же) – конденсатор C1 и резисторы

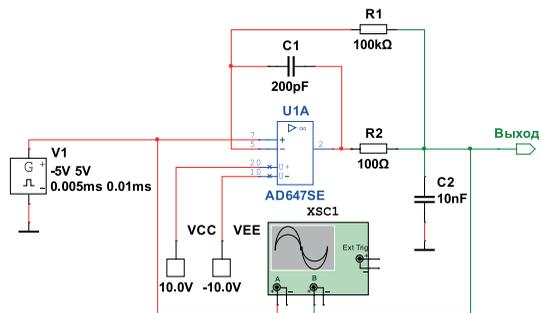


Рис. 1. Пример включения ОУ при работе на емкостную нагрузку

R1, R2. Чтобы оценить длительность переходного процесса самого Оу воспользуемся моделью, приведенной на рис. 3. На рис. 4 приведен отклик ОУ типа AD647 (с ультранизким дрейфом напряжения смещения) на биполярный входной импульс амплитудой ± 5 В.

Как следует из рисунка, время переходного процесса усилителя составляет примерно 1 мкс при нагрузке усилителя на сопротивление 100 кОм и примерно 2 мкс – при нагрузке 100 Ом.

Для анализа влияния емкости конденсатора и сопротивления резисторов воспользуемся инструментом Parameter Sweeper и проанализируем влияние емкости конденсатора C1 на переходной процесс. Результаты анализа приведены на рис. 6.

Анализ рис. 6 позволяет сделать вывод о том, что увеличение емкости C1 свыше 210 пФ очень слабо влияет на характер переходного процесса. Результаты анализа влияния сопротивления резисторов R1 и R2 (при емкости C1 = 200 пФ) на характер переходного процесса приведены на рис. 7 и 8,

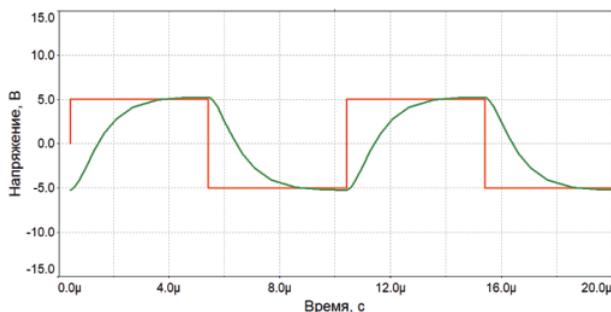


Рис. 2. Осциллограммы входного (красная) и выходного сигналов усилителя, приведенного на рис. 1

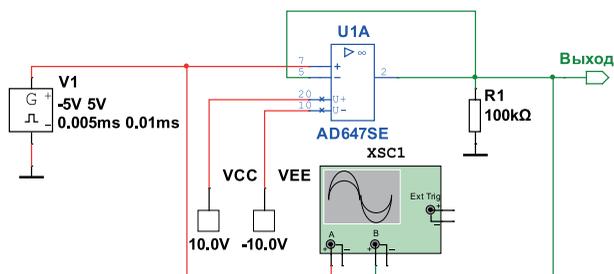
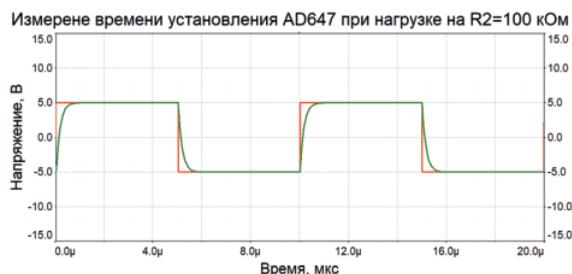
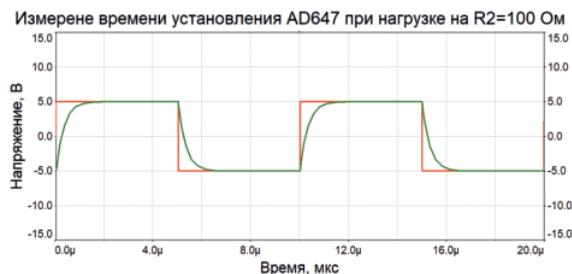


Рис. 3. Модель для проверки времени переходного процесса ОУ AD647



а)



б)

Рис. 4. Осциллограммы сигналов входного (красная) и выходного сигналов усилителя AD647, работающего в режиме повторителя напряжения при сопротивлении нагрузки 100 кОм (а) и 100 Ом (б)

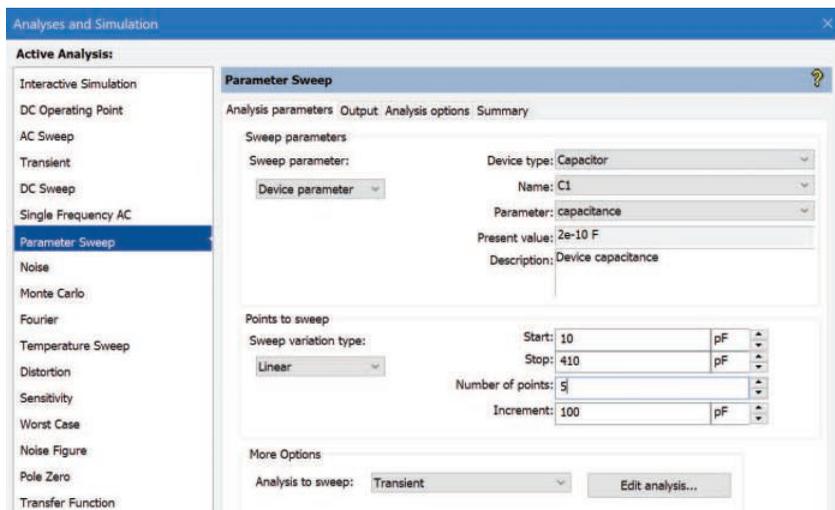


Рис. 5. Окно настройки параметров Parameter Sweep для анализа влияния емкости конденсатора C1 на характер переходного процесса

соответственно.

Анализ рис. 7 и 8 показывает, что наибольшее влияние на характер переходного процесса оказывает сопротивление резистора R2, а номинальные значения элементов на рис. 1 являются оптимальными с точки зрения переходного процесса.

В [1] приведены рекомендации по выбору элементов коррекции усилителя при его работе на емкостную нагрузку для минимизации времени переходных процессов:

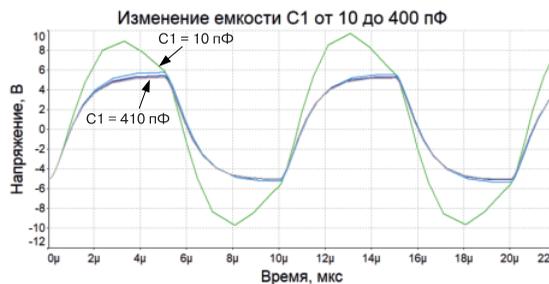


Рис. 6. Осциллограммы выходного сигнала при различных значениях емкости конденсатора C1

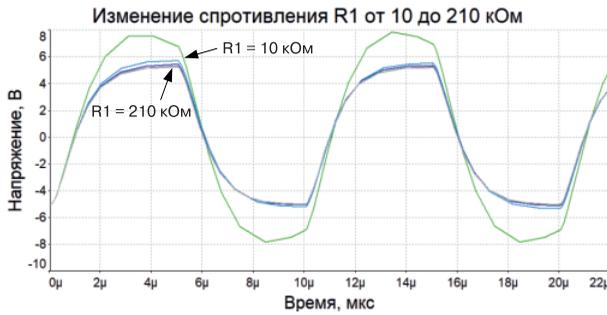


Рис. 7. Осциллограммы выходного сигнала при различных значениях сопротивления R_1

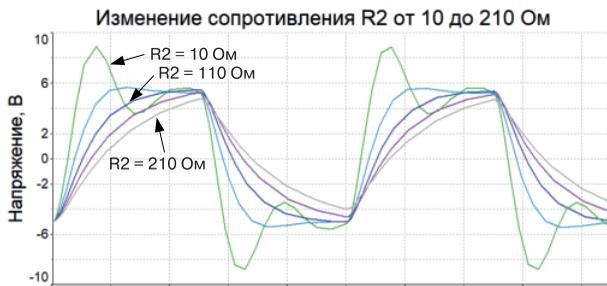


Рис. 8. Осциллограммы выходного сигнала при различных значениях сопротивления R_2

- операционный усилитель должен быть стабильным при использовании двух цепей обратной связи при единичном коэффициенте усиления
- запас по фазе буфера с единичным усилением должен быть более 45°
- коэффициент обратной связи

$$K_{OC} = (R_1 C_1) / (R_2 C_2) > 2.$$

Для приведенной на рис. 1 схемы

$$K_{OC} = (R_1 C_1) / (R_2 C_2) = (10^5 \cdot 200 \cdot 10^{-12}) / (100 \cdot 10^{-8}) = 20.$$

Однако анализ влияния R_1 на характер переходного процесса показывает, что при сопротивлении резистора $R_1 = 10$ Ом значение $K_{OC} = 200$, а переходной процесс совершенно неприемлем с точки зрения минимизации выбросов выходного напряжения.

Т.е. указанных критериев явно недостаточно для верного выбора элементов. Кроме того, выбор сопротивления резистора R_2 не может быть произвольным, т.к. он ограничивает ток заряда емкости нагрузки.

С учетом того, что время заряда конденсатора интегрирующей цепи примерно равно 3τ , где τ – постоянная времени цепи $R_2 C_2$, можно найти максимальное значение сопротивления R_2 при заданном

значении емкости нагрузки.

Рассчитаем это значение для $C_2 = 10$ нФ и времени переходного процесса ОУ равного 1 мкс, предполагая, что на выходе ОУ напряжение изменяется скачком (скорость нарастания выходного напряжения бесконечно велика).

$$R_2 \leq 3\tau / C_2 = 1 \cdot 10^{-6} / 10 \cdot 10^{-9} = 100 \text{ Ом}.$$

При выборе сопротивления резистора R_2 нужно учитывать выходной ток ОУ и максимальное выходное напряжение. Из рис. 4,б следует, что при сопротивлении нагрузки 100 Ом время переходного процесса усилителя составляет примерно 2 мкс. Следовательно применение корректирующих цепей при работе на емкостную нагрузку не позволит реализовать более короткое время переходного процесса.

Почему рассчитанное время заряда конденсатора и полученное в результате моделирования не совпадают? Это объясняется тем, что скорость изменения напряжения на выходе усилителя и его выходной ток ограничены, что и приводит к увеличению времени переходного процесса.

В момент скачка напряжения на выходе ОУ значение тока будет приблизительно равно $U_{\text{вых.ампл}} / R_2$. Для схемы, приведенной на рис. 1, скачок тока может составлять $10 \text{ В} / 100 \text{ Ом} = 0.1 \text{ А}$. Если усилитель такой ток не обеспечивает, это приведет к увеличению времени переходного процесса.

К сожалению, многие производители не указывают максимальный ток нагрузки и определять параметры такого ОУ нужно или путем моделирования, или экспериментально. Снизить требования к максимальному значению выходного тока ОУ можно снизив амплитуду входного сигнала.

Исходя из вышеизложенного, предлагается следующий порядок определения номинальных значений элементов схемы:

1. Измеряем время переходного процесса выбранного ОУ при заданной амплитуде входного сигнала, нагруженного на активное сопротивление величина которого изменяется от 10 Ом до величины, при которой амплитуда сигнала на выходе не достигнет амплитуды входного сигнала. Минимальное сопротивление нагрузки можно выбрать и меньшего значения в зависимости от амплитуды выходного сигнала.

Рассмотрим это на примере ОУ типа AD712 (прецизионный усилитель с высокой скоростью нарастания) при амплитуде входного напряжения $\pm 1 \text{ В}$

(рис. 9).

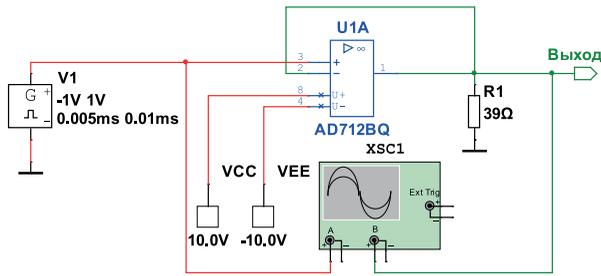


Рис. 9. Модель повторителя на ОУ AD712 для проверки нагрузочной способности и времени переходного процесса

Зададим изменение сопротивления нагрузочного резистора R1 от 10 до 100 Ом. Результат анализа выходного сигнала ОУ приведен на рис. 10.

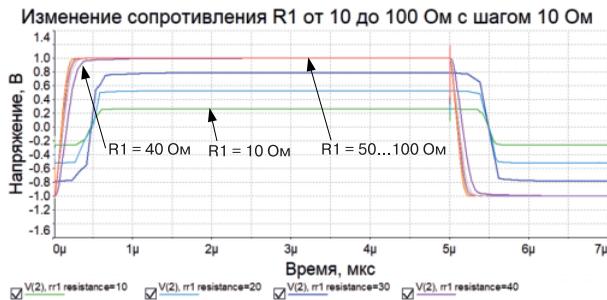


Рис. 10. Зависимости выходного напряжения ОУ AD712 от сопротивления нагрузки

Из рис. 10 следует, что минимальное время переходного процесса обеспечивается при сопротивлении нагрузки 50 и более Ом, а минимально допустимое сопротивление нагрузки составляет 40 Ом. Время завершения переходного процесса при сопротивлении 50 Ом составляет примерно 0.22 мкс. Выходной ток ОУ не превышает 25 мА, что необходимо учитывать при выборе ограничивающего резистора.

Задаемся величиной сопротивления $R_2 = 51 \text{ Ом}$,

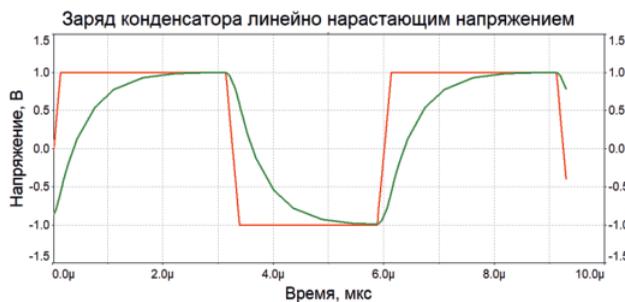
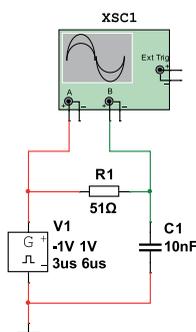


Рис. 11. Измерение времени заряда конденсатора линейно нарастающим напряжением

обеспечивая максимальную скорость заряда конденсатора.

2. Значение сопротивления R1 выбирается равным $R_1 = 2R_2 \cdot 10^3 = 100 \text{ кОм}$.

3. Для расчета величины емкости конденсатора C1 измерим время заряда конденсатора C2 (емкость нагрузки) при подаче на вход интегрирующей цепи линейно нарастающего напряжения с временем нарастания 0.25 мкс при изменении входного напряжения в диапазоне от -1 до +1 В. Модель и результаты измерения напряжения на конденсаторе приведены на рис. 11.

При заряде конденсатора линейно нарастающим напряжением со скоростью изменения 8 В/мкс (время изменения входного напряжения от -1 до 1 В составляет 0.25 мкс), время его полного заряда составляет 2 мкс, что следует из рис. 11. Т.е. фактически время установления выходного напряжения на выходе ОУ будет определяться этим фактором.

4. Емкость конденсатора C1 рассчитаем из условия $K_{OC} = (R_1 C_1) / (R_2 C_2) \geq 80$. Откуда

$$C_1 = 80 R_2 C_2 / R_1 = 80 \cdot 51 \cdot 10^{-8} / 100 \cdot 10^3 = 408 \cdot 10^{-12} \text{ Ф.}$$

Принимаем значение $C_1 = 390 \text{ пФ}$.

5. Проверяем верность вычислений с помощью модели, приведенной на рис. 12.

Результаты измерения переходного процесса приведены на рис. 13.

Как следует из рис. 13, характер переходного процесса практически идентичен приведенному на рис. 11. При увеличении K_{OC} до 200 (что соответствует значению $C_1 = 620 \text{ пФ}$) выходной сигнал практически не отличается от приведенного на рис. 13.

Проведенные эксперименты показывают, что на время установления ОУ при работе на емкостную нагрузку влияет много факторов:

- скорость нарастания выходного напряжения ОУ

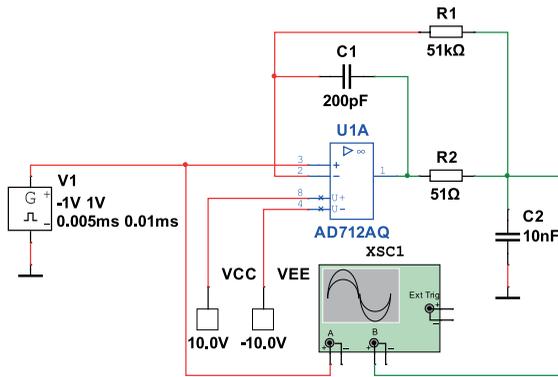


Рис. 12. Модель, реализующая рассчитанные параметры при использовании ОУ AD712

- максимальный выходной ток ОУ
- ширина полосы пропускания ОУ
- амплитуда выходного сигнала.

Поэтому для учета всех этих факторов наиболее рациональным путем является моделирование таких устройств. При моделировании можно быстро исследовать влияние различных факторов на характер переходного процесса.

Расчетные соотношения, приведенные в статье,

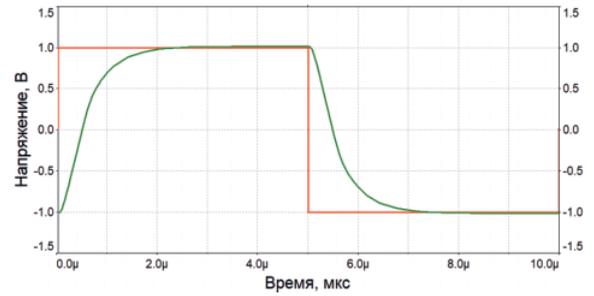


Рис. 13. Выходное напряжение ОУ при значении сопротивления R2 = 51

получены эмпирическим путем по результатам моделирования и позволяют просто рассчитать элементы схемы для обеспечения минимального времени переходного процесса на выходе ОУ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Optimizing Input and Output Transient Settling Times in Amplifier Circuits [https:// Analog Design Journal Q3? 2021/](https://analogdesignjournal.com/q3/2021/) pp. 1-6.
<https://www.ti.com/lit/an/slyt817/slyt817.pdf?ts=1660125685522>

FREEDOM

Компоненты для светильников с беспроводным управлением

Модуль беспроводной связи Freedom Node
 Блок радиосвязи с программным обеспечением для систем освещения с беспроводным управлением. Простота установки внутри или снаружи светильника.

Модуль ActiveAhead Node Sense (5634)
 Сверхкомпактный модуль Bluetooth с датчиками движения и освещенности для организации беспроводного управления освещением с помощью беспроводной Mesh сети.

Helvar

Светодиодные драйверы Freedom

Тип	Макс. мощность, Вт	Корпус	Ток нагрузки, mA
LC25-FD-350-700	25	Компакт	350 – 700
LC35-FD-700-1050	35	Компакт	700 – 1050
LL10-42-FD-120-350	42	Линейный	900 – 1400
LC50-FD-900-1400	50	Компакт	120 – 350
LL50SE-FD-100-1400	50	Линейный	100 – 1400
LL23-80-FD-150-350	80	Линейный	150 – 350
LL80-FD-350-700	80	Линейный	350 – 700
LL110-FD-350-700	110	Линейный	350 – 700
LL150-FD-350-700	150	Линейный	350 – 700

VD MAIS
ДИСТРИБЬЮЩИЙ
КОНТРАКТНОЕ
ПРОИЗВОДСТВО

VD MAIS – официальный дистрибьютор компании Helvar в Украине

тел.: (044) 201-0202, (057) 719-6718, (0562) 319-128, (062) 385-4947, (032) 245-5478, (048) 734-1954, (095) 274-6897, info@vdmiais.ua, www.vdmiais.ua