

Моделирование выходного усилителя фотоприёмного устройства

А.В. Ярцев¹, С.А. Синютин¹, А.Ю. Киснер², С.Н. Гаранжа²

¹Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

²ОАО «Научно-производственное предприятие космического приборостроения
“Квант”»

Аннотация: Распознавание излучения от небесных тел техническими средствами является важной задачей при ориентации космических аппаратов. Для устройства, входящего в состав прибора ориентации по Земле, исследован вариант моделирования усилителя электронного сигнала, полученного от пирозлектрического датчика. По рекомендации разработчиков изучены свойства трансимпедансных операционных усилителей, подобраны подходящие коэффициенты для цепи отрицательной обратной связи. Изучен вид выходного сигнала модели в сопоставлении с записью значений, снятых с реального фотоприёмного устройства. Показан предпочтительный вариант оформления модели в среде Matlab Simulink – модель, задаваемая электрической схемой с помощью библиотеки Simscape Electrical.

Ключевые слова: моделирование электрических схем, космическая ориентация, фотоприёмное устройство, трансимпедансный усилитель, оптико-электронные приборы, космическое приборостроение.

Объектом исследования является выходной усилитель фотоприёмного устройства для прибора ориентации по Земле. Это устройство является автоматическим оптико-электронным прибором пассивного типа, то есть воспринимает исключительно собственное излучение светил, фонов и отраженное излучение естественных источников. Важность подобных приборов для развития космической техники весьма высока, но в РФ их умеют производить считанные единицы предприятий, ведущие разработки в этой области с самого начала формирования советской космической программы, в число которых входит и предприятие-заказчик данной работы – ОАО «НПП КП «Квант». Теоретические основы разработки подобных устройств закладывались в НПО «Геофизика-Космос» [1].

Общая схема работы оптико-электронного прибора согласно [2,3] показана на рис.1.

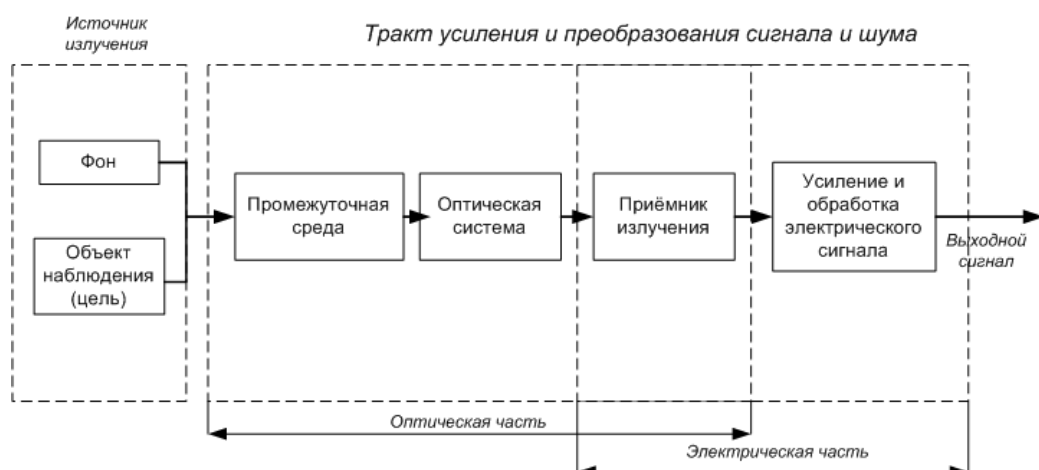


Рис. 1 – Схема опто-электронного прибора

Предметом исследований стала электрическая часть прибора. Исследование свойств приёмника излучения было проведено ранее, и поэтому физические свойства выходного усилителя являются предметом естественного интереса для дальнейшего изучения.

Отклик приёмника при воздействии излучения произвольной формы [4] можно записать в виде формулы (1):

$$\frac{dU(t)}{dt} + \frac{1}{\tau_{\epsilon}} U(t) = \frac{A_0 \gamma \epsilon}{C_{кр} c} \left(W(t) - \frac{1}{\tau_T} e^{-\frac{t}{\tau_T}} \int_0^t e^{\frac{\tau}{\tau_T}} W(\tau) d\tau \right). \quad (1)$$

где:

τ_{ϵ} – электрическая постоянная времени, $\tau_{\epsilon} = R_{кр} C_{кр}$;

τ_T – тепловая постоянная времени кристалла чувствительного элемента,

$\tau_T = c / G_{np}$;

A_0 — величина площади приёмной площадки;

$\gamma = \frac{dP_c}{dT}$ - пирозлектрический коэффициент;

c — теплоёмкость чувствительного элемента;

ϵ — диэлектрическая постоянная кристалла.

Для приёмника величина мощности излучения $W(t)$ является входным воздействием, а напряжение $U(t)$ – выходным. Крутизной этого

преобразования является интегральная чувствительность S , которая определяет величину сигнала, вырабатываемого приёмником на единицу падающего на него потока излучения.

Было теоретически рассчитано, что при величине тепловой постоянной времени пироприёмника, во много раз превышающей длительность фронта светового (теплого) импульса, форма переднего фронта сигнала воспроизводит форму переднего фронта импульса $W(t)$. Далее, если значение теплового потока не изменяется, то после достижения максимума сигнал спадает экспоненциально за счет τ_T . Моделирование в среде Simulink подтвердило эту закономерность.

По причине малых размеров приёмного устройства и значительного удаления от источников ИК-излучения, его выходной сигнал имеет малое напряжение, и для использования информации этого сигнала его необходимо усилить. Это важно изучить потому, что при работе реального устройства к полезному сигналу могут добавляться различные помехи. Интенсивность излучения от Солнца является наибольшей из возможных в околоземном пространстве, также важны излучения Луны и различных зон Земли (очевидно, что тропические пустыни излучают больше инфракрасных лучей, нежели полярные льды). Энергетические расчёты, проведённые разработчиками устройства, показывают, что выходное напряжение ФПУ при входном излучении от Луны, Земли и Солнца соотносится примерно, как 1:5:50, при этом наибольшее выходное напряжение не превосходит 3 В.

Согласно информации от производителей исследуемого устройства, датчик излучения подключается на вход операционного усилителя, охваченного глубокой отрицательной обратной связью. Так как в цепи обратной связи усилителя, кроме активного, присутствует и реактивное сопротивление в виде паразитной ёмкости, интересующий нас усилитель является трансимпедансным. Передаточная функция трансимпедансного

операционного усилителя (ТИОУ) представляет собой зависимость выходного напряжения от входного тока и имеет размерность сопротивления [5 – 8]. К ТИОУ относятся ОУ с токовой обратной связью. Когда ко входу ОУ с обратной связью по напряжению подключён источник тока, например фотодиод (в обратную связь в этом случае включается резистор с большим сопротивлением), ОУ также можно считать ТИОУ. Для стабилизации схемы параллельно этому резистору ставится конденсатор достаточно большой ёмкости. Как сообщается в [8,9], преимуществом схемы с трансимпедансным усилителем является высокая чувствительность при большой ширине полосы пропускания, поэтому такие усилители хорошо подходят для использования в оптических приёмниках. В [10] описано применение такого усилителя для пироприёмника ИК-излучения, схожего с исследуемым устройством тем, что тепловой сигнал на него подаётся короткими импульсами.

Для моделирования исследуемой системы была выбрана программная среда Matlab Simulink, которая часто используется в задачах моделирования систем управления различного назначения [11]. Поскольку моделировать предполагается электрические процессы, то представляется логичным использовать дополнение Simscape Electrical, в предыдущих версиях Matlab известное под названием SimPowerSystems. Согласно [12, 13], операционный усилитель в Simulink можно реализовать в виде последовательности блоков Gain, Transfer Function и Saturation: первый обозначает номинальный коэффициент усиления, второй реализует зависимость результирующего коэффициента усиления от частоты среза, а блок насыщения означает предельное значение модуля выходного напряжения. Отрицательную обратную связь реализуем с помощью параллельно включённых блоков Gain и Integrator (для активного и для реактивного сопротивления).

Также в дополнении Matlab Simscape Electrical имеется возможность создать модель ТИОУ непосредственно в виде электрической схемы.

Модель ФПУ с усилителем в среде Simulink имеет вид, показанный на рисунках ниже. На рис. 2 изображён общий вид модели.

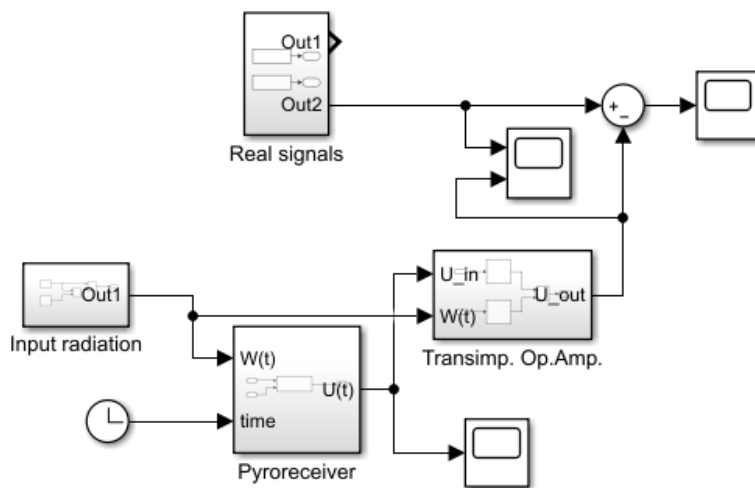


Рис. 2 – Общий вид модели ФПУ в Simulink

Модель состоит из нескольких подсистем:

- входное излучение,
- пироприёмник,
- выходной трансимпедансный усилитель (аналоговый выход ФПУ),
- реальный сигнал (записанные данные для сравнения с моделью).

На рис.3 показана структура подсистемы выходного усилителя. Для удобства сравнения здесь реализовано два варианта модели: в виде передаточных функций (рис. 4) и в виде электрической принципиальной схемы с использованием библиотеки Simscape Electrical (рис. 5). Можно заметить, что в электрической схеме на вход подаётся не выходное напряжение пироприёмника, а мощность излучения, а сам пироприёмник задан в виде схемы замещения, как это рекомендовалось в литературе: источник тока, резистор большого сопротивления и конденсатор.

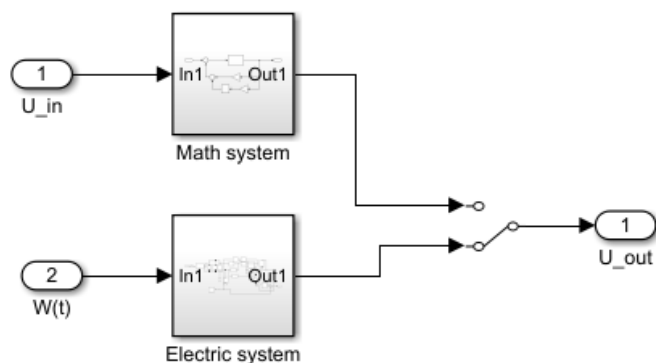


Рис. 3 – Общий вид модели выходного усилителя

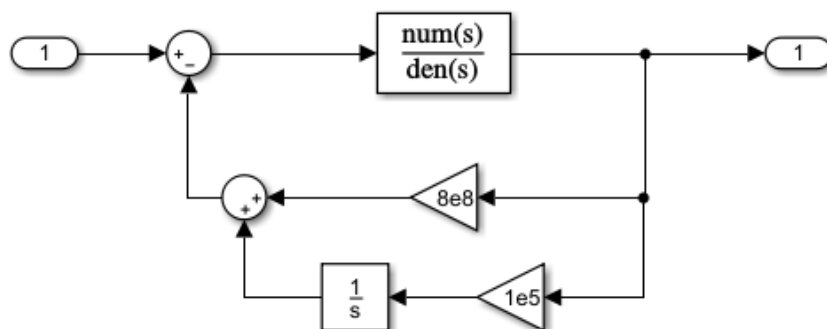


Рис. 4 – Задание выходного усилителя передаточной функцией

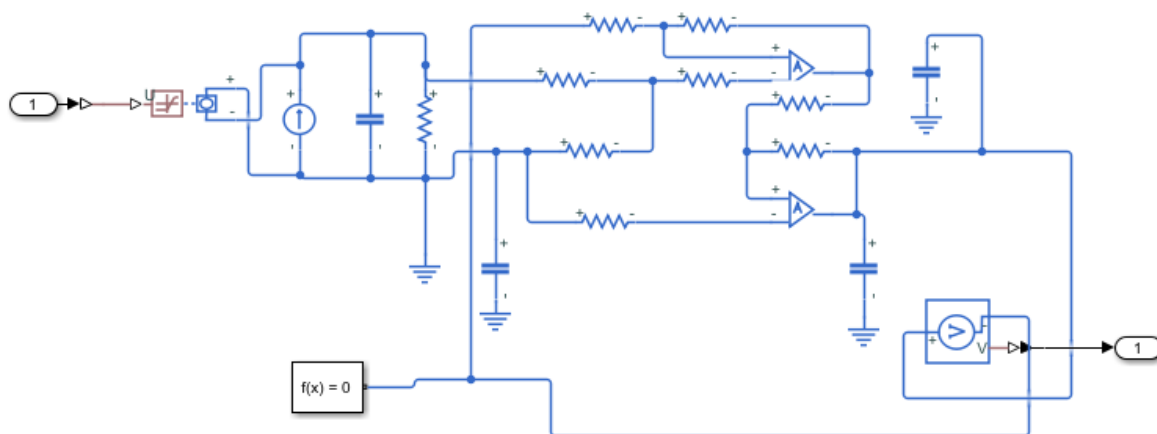


Рис. 5 – Задание выходного усилителя электрической схемой

В модели автоматически назначен решатель ode23t: это позволяет запускать электрическую схему в Simscape.

Для испытания системы подадим на вход прямоугольный импульс с параметрами, подобранными так, чтобы выходной сигнал модели совпадал с записью реального сигнала возможно точнее.

В качестве реального сигнала подаётся переменная из рабочего пространства, заданная как зависимость амплитуды от времени. Такие переменные можно создавать из файлов данных посредством импорта в Matlab.

Вид сигнала на выходе пироприёмника показан на рис. 6. Эта форма сигнала очень схожа с той, которую описывают в литературе по пироприёмным устройствам, и вызвана наличием экспоненциальной зависимости в формуле выходного напряжения ППИ.

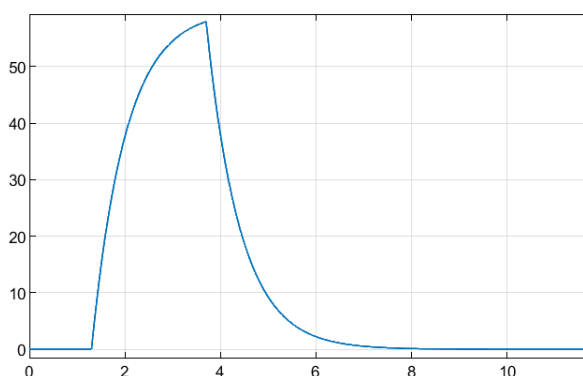


Рис. 6 – Вид сигнала на выходе пироприёмника ФПУ

Опытным путём были подобраны следующие коэффициенты для обратной связи усилителя в математической модели: активная составляющая - $8 \cdot 10^8$ Ом, реактивная – 10 мкФ. При этих значениях и амплитуде входного сигнала в 16 условных единиц график выходного сигнала выглядит, как показано на рис. 7.

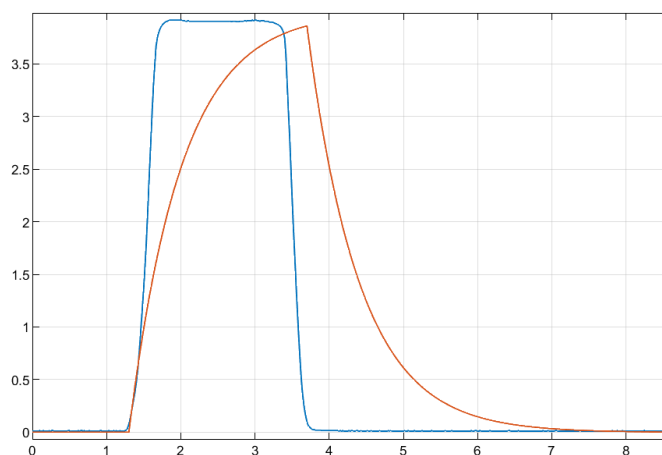


Рис. 7 – Вид выходного сигнала ФПУ с подстроенными параметрами

Можно видеть, что переходный процесс на выходе модели ФПУ достаточно длителен, а вид графика схож с тем, что был получен для выхода пироприёмника. Но график реального сигнала имеет другую форму, из чего можно сделать вывод, что моделирование выходного усилителя передаточной функцией не отражает всех особенностей реального объекта.

Для электрической модели ППИ и выходного усилителя, построенной в Simscare, был получен вид графика выходного сигнала, показанный на рис. 8.

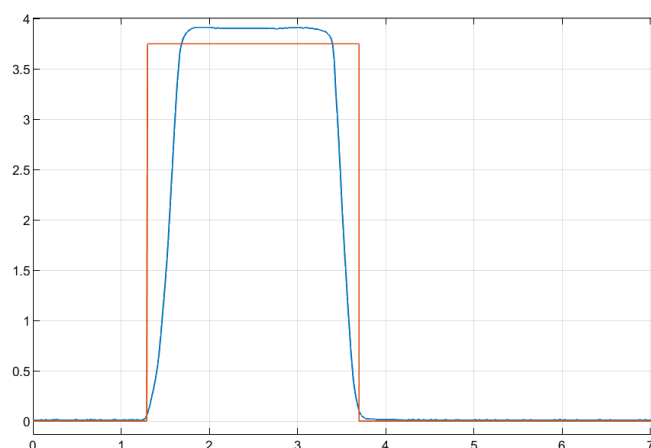


Рис. 8 - Сравнение выхода модели усилителя в Simscare и реального сигнала

Показанный график совпадает с реальными показаниями гораздо точнее, хотя и имеет строго прямоугольную форму вместо трапециевидальной. Это можно связывать с мелкими конструктивными и схмотехническими особенностями устройства.

В целом можно заключить, что моделирование выходного усилительного тракта ФПУ в среде Simulink возможно осуществить двумя способами и получить удовлетворительные результаты, но моделирование посредством электрической схемы в Simscape даёт более точные результаты из-за учёта большего числа особенностей строения объекта в модели.

Работы, результаты которых представлены в данной статье, проводились на базе ФГАОУ ВО ЮФУ совместно с ОАО НПП КП «Квант» в рамках проекта: «Разработка и создание инновационного стендового оборудования и высокотехнологичного производства радиационностойкого малогабаритного прибора ориентации космических аппаратов на Землю секущего типа на базе электронных компонентов отечественного производства» по Постановлению Правительства РФ №218 "О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства" от 9 апреля 2010 г.

Литература

1. Мотин В.Н. 30 лет – восхождение продолжается // Инженерный вестник Дона, 2009, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2009/140.
2. Мирошников М.М. Теоретические основы оптико-электронных приборов. Учебное пособие для вузов. Л., Машиностроение, 1977. 600 с., ил.
3. Федосеев В.И., Колосов М.П. Оптико-электронные приборы ориентации и навигации космических аппаратов. Учебное пособие. М., Логос, 2007. 248 с., ил.

4. Кременчугский Л.С., Ройцина О.В. Пироэлектрические приемники излучения. - Киев. 1979, 382 с.

5. Вестерман Дэвид, National Semiconductor. Применение трансимпедансных усилителей. Новости электроники, №5, 2008. С.29-31.

6. Трифонов А.В. Расчёт корректирующей ёмкости трансимпедансного усилителя. Вестник Концерна ВКО "Алмаз – Антей". 2018. № 1 (24). С. 6-9.

7. Corder D.A., Evans D.R., Tyrer J.R. A novel method for energy measurement of short optical pulses. - Measurement Science and Technology, v.8, №9. 1997. Pp. 1034-1040.

8. Masalov A.V., Kuzhamuratov A., Lvovsky A.I. Noise spectra in balanced optical detectors based on transimpedance amplifiers. - Review of Scientific Instruments, 2017, v.88, №11: 113109. DOI: 10.1063/1.5004561.

9. Дукович Е.С., Светиков А.В. Исследование схемотехнической модели оптического приёмника для системы регистрации сигналов. Молодёжь в науке. Сборник докладов 16-й научно-технической конференции, г. Саров, 25-27 октября 2017 г. ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», Саров, 2017. С. 29-35.

10. Иванов С.Д., Косцов Э.Г., Соболев В.С. Быстродействующий приёмник ИК-излучения на основе пироэлектрических плёнок. Интерэкспо Гео-Сибирь, т.5, г. Новосибирск, №1 – 2017. С. 130-134.

11. Степанов К.С., Панкова Н.Г. Оптимизация лабораторного практикума по электротехнике с применением системы Matlab Simulink // Инженерный вестник Дона, 2014, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2014/2628.

12. Павлейно М.А., Ромаданов В.М., Сафронова Ю.Ф., Статуя А.А. Моделирование работы электрических схем в Simulink. Применение операционных усилителей для фильтрации, усиления и генерации сигналов. // Учебно-методическое пособие: СПб., изд. СПбГУ, 2007. 210 с.

13. Matlab Documentation - mathworks.com/help/.

References

1. Motin V.N. Inzhenernyj vestnik Dona, 2009, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2009/140.
 2. Miroshnikov M.M. Teoreticheskiye osnovy optiko-elektronnykh priborov [Theoretical foundations of optoelectronic devices]. Uchebnoye posobiye dlya vuzov. L., Mashinostroyeniye, 1977. 600 p.
 3. Fedoseyev V.I., Kolosov M.P. Optiko-elektronnyye pribory oriyentatsii i navigatsii kosmicheskikh apparatov [Optoelectronic devices for orientation and navigation of spacecraft]. Uchebnoye posobiye. M., Logos, 2007. 248 p.
 4. Kremenchugskiy L.S., Roytsyna O.V. Piroelektricheskiye priyomniki izlucheniya [Pyroelectric radiation detectors]. Kiev. 1979, 382 p.
 5. Vesterman Devid, National Semiconductor. Primeneniye transimpedansnykh usiliteley. Novosti elektroniki, №5, 2008. pp. 29-31.
 6. Trifonov A.V. Raschët korrektruyushchey yëmкости transimpedansnogo usilitelya. Vestnik Kontserna VKO "Almaz – Antey". 2018. № 1 (24). pp. 6-9.
 7. Corder D.A., Evans D.R., Tyrer J.R. A novel method for energy measurement of short optical pulses. - Measurement Science and Technology, v.8, №9. 1997. pp. 1034-1040.
 8. Masalov A.V., Kuzhamuratov A., Lvovsky A.I. Noise spectra in balanced optical detectors based on transimpedance amplifiers. - Review of Scientific Instruments, 2017, v.88, №11: 113109. DOI: 10.1063/1.5004561.
 9. Dukovich E.S., Svetikov A.V. Molodëzh' v nauke. Sbornik dokladov 16-y nauchno-tehnicheskoy konferentsii, Sarov, 25-27 oktyabrya 2017. FGUP «RFYATS-VNIIEF», Sarov, 2017. pp. 29-35.
 10. Ivanov S.D., Kostsov E.G., Sobolev V.S. Interekspo Geo-Sibir', t.5, Novosibirsk, №1 – 2017. pp. 130-134.
 11. Stepanov K.S., Pankova N.G. Inzhenernyj vestnik Dona, 2014, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2014/2628.
-

12. Pavleyno M.A., Romadanov V.M., Safronova YU.F., Statuya A.A. Modelirovaniye raboty elektricheskikh skhem v Simulink. Primeneniye operatsionnykh usiliteley dlya fil'tratsii, usileniya i generatsii signalov [Simulation of electrical circuits in Simulink. Application of operational amplifiers for filtering, amplification and signal generation]. Uchebno-metodicheskoye posobiye: SPb., izd. SPbGU, 2007. 210 p.
13. Matlab Documentation - mathworks.com/help/.