

## ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 681.518.5

DOI 10.22213/2410-9304-2018-2-41-47

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОГО КАНАЛА СВЯЗИ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

*В. А. Куликов*, доктор технических наук, профессор, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

*В. Н. Сяктерев*, кандидат технических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

*В. В. Сяктерева*, кандидат технических наук, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

*В работе предложены модели оптического канала связи телеметрической измерительной системы, предназначенной для измерения температуры поршня работающего двигателя внутреннего сгорания. Канал связи реализован между первичными и промежуточным преобразователями, устанавливаемыми на поршне и стационарными блоками приема и обработки измерительной информации системы, расположенными за пределами двигателя. Канал включает излучатель, фотоприемник и схему восстановления амплитуды импульсных информационных сигналов. Модели канала связи представлены в среде Micro-Cap и реализованы на идеальных и реальных активных элементах (операционном усилителе и компараторе напряжения). Исследования переходных процессов на моделях в режиме анализа Transient программы Micro-Cap при передаче информации в длительности оптических импульсов показали, что в канале связи допускается модуляция амплитуды оптических импульсов до 30 дБ при погрешности передачи не более 1 % в диапазоне частот оборотов двигателя от 10 до 100 Гц и длительности импульсов от 10 мкс до 1 мс. Моделируемый канал может быть использован в реальных телеметрических системах измерения температуры и других физических параметров двигателей внутреннего сгорания в процессе их экспериментальных исследований и доводки.*

**Ключевые слова:** телеметрическая измерительная система, оптический канал связи, модуляция амплитуды импульсных сигналов, моделирование канала связи.

#### Введение

В специализированных телеметрических системах, например, предназначенных для измерения физических величин подвижных деталей машин, используются оптические каналы для передачи измерительной информации с детали в стационарную часть измерительной системы [1]. При этом на детали устанавливаются первичные преобразователи (датчики физических величин) и блок преобразования и передачи измерительной информации с излучателем оптического сигнала, а в стационарной части системы размещены фотоприемник и блок преобразования и обработки измерительного сигнала.

Разработана система для измерения температуры поршня работающего двигателя внутреннего сгорания [2, 3], в которой на

поршне двигателя установлены термопреобразователи сопротивления, преобразующий и передающий оптический сигнал блок, а в картере – фотоприемник (фотодиод) и далее за пределами двигателя приемная аппаратура с блоками обработки измерительной информации. Информация по оптическому каналу связи передается в длительности оптических импульсов или длительности периода их следования.

Одной из проблем, возникших при создании и эксплуатации такой системы, оказалось присутствие модуляции амплитуды оптического сигнала на входе фотоприемника за счет движения поршня и изменения расстояния между излучателем и фотоприемником, что при наличии инерционности фотоприемника приводит к искажению измерительной информации. Определенное



Управляющая цепь источника G1 включена в коллекторную цепь транзистора источника излучения параллельно резистору R12, а управляемая цепь задает ток в приемной части системы (генерирует фототок фотодиода). Коэффициент передачи источника тока выбран на уровне 0,01 А/В, что соответствует условиям передачи потока реального оптического сигнала по оптическому тракту канала. Конденсатор С3 представляет собой барьерную емкость обратно смещенного фотодиода.

Усилитель фотоприемника представлен идеальным управляемым напряжением источником напряжения E3. Коэффициент передачи (усиления) источника выбран на уровне  $10^9$  единиц, что максимально приближает его к идеальному ОУ. Источник включен по инвертирующей схеме включения ОУ. Цепь обратной связи представлена резистором R14. Ограничения по амплитудно-частотной характеристике задаются с помощью конденсатора С4.

Схема восстановления длительности информационных импульсных сигналов построена на основе управляемого напряжением идеального источника напряжения E2. Для того чтобы реализовать режим компаратора, в схему дополнительно введены два управляемых ключа SW1 и SW2. При этом первый ключ обеспечивает низкий уровень напряжения на выходе схемы, равный 0 В, второй ключ формирует высокий уровень напряжения, определяемый источником V4 и равный 5 В. В целом на компонентах E2, R2, R3, R10, C2, SW1, SW2 и V4 реализована схема ИФАП. Номинальные значения параметров пассивных компонентов канала рассчитаны, исходя из реальных условий его реализации в измерительной системе и в том числе рекомендаций по выбору компонентов для схемы ИФАП, изложенных в работе [8].

Принцип работы оптического канала связи поясняется временными диаграммами на рис. 2, полученными в режиме исследования переходных процессов Transient в программе Micro-Cap.

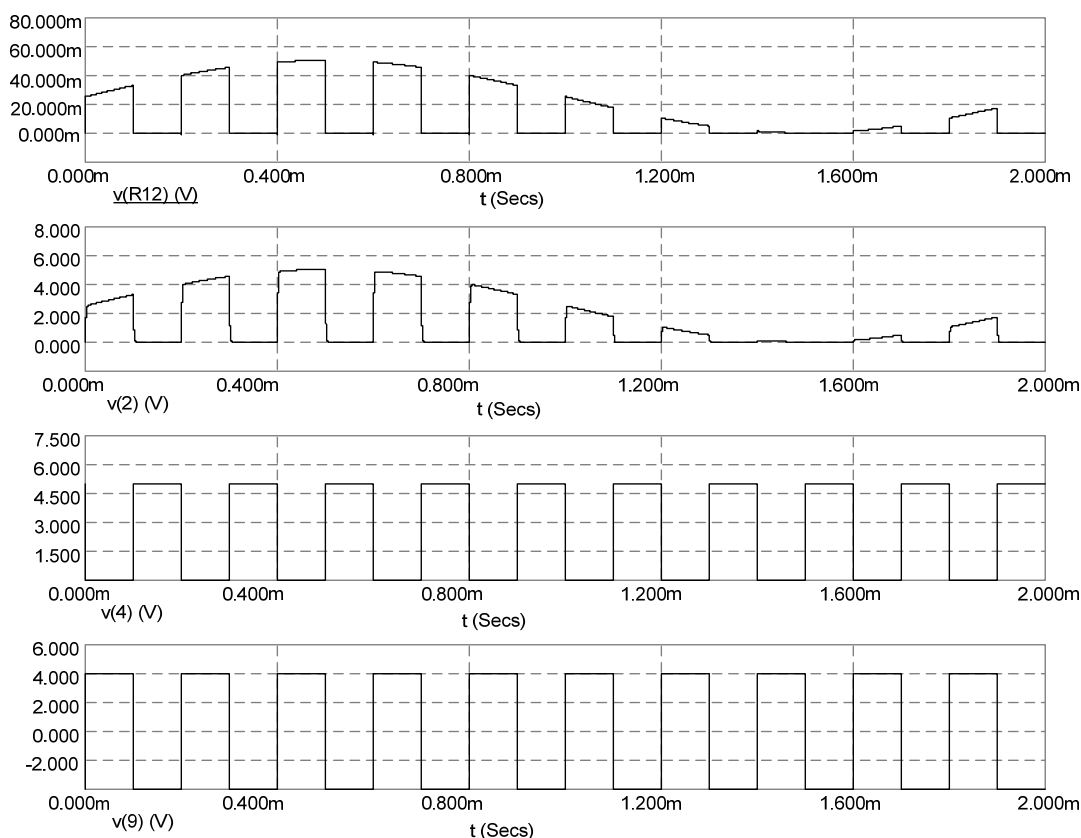


Рис. 2. Временные диаграммы работы оптического канала связи на идеальных активных компонентах

Напряжение  $V(R12)$  на резисторе R2 моделирует поток оптического сигнала, поступающего на фотоприемник, напряжение  $V(2)$  в точке 2 схемы показывает, как изменяется уровень электрического сигнала на выходе преобразователя фототока на идеальном ОУ E2. Видно, что вследствие инерционности фотодиода и ОУ фронты и спады электрических импульсов имеют увеличенную длительность. Напряжение  $V(4)$  в точке 4 схемы соответствует восстановленному по амплитуде и длительности информационному сигналу на выходе ИФАП. Здесь же приведена временная диаграмма  $V(9)$  в точ-

ке 9 исходного передаваемого информационного сигнала, по отношению к которому выходной информационный сигнал  $V(4)$  инвертирован.

Для проверки возможностей оптического канала связи и его свойств при использовании реальных активных компонентов разработана модель, представленная на рис. 3.

Здесь усилитель тока фотодиода реализован на реальном операционном усилителе X1 общего применения К140УД6, а ИФАП построен на реальном компараторе напряжения К554СА3 с открытыми коллектором и эмиттером на выходе.

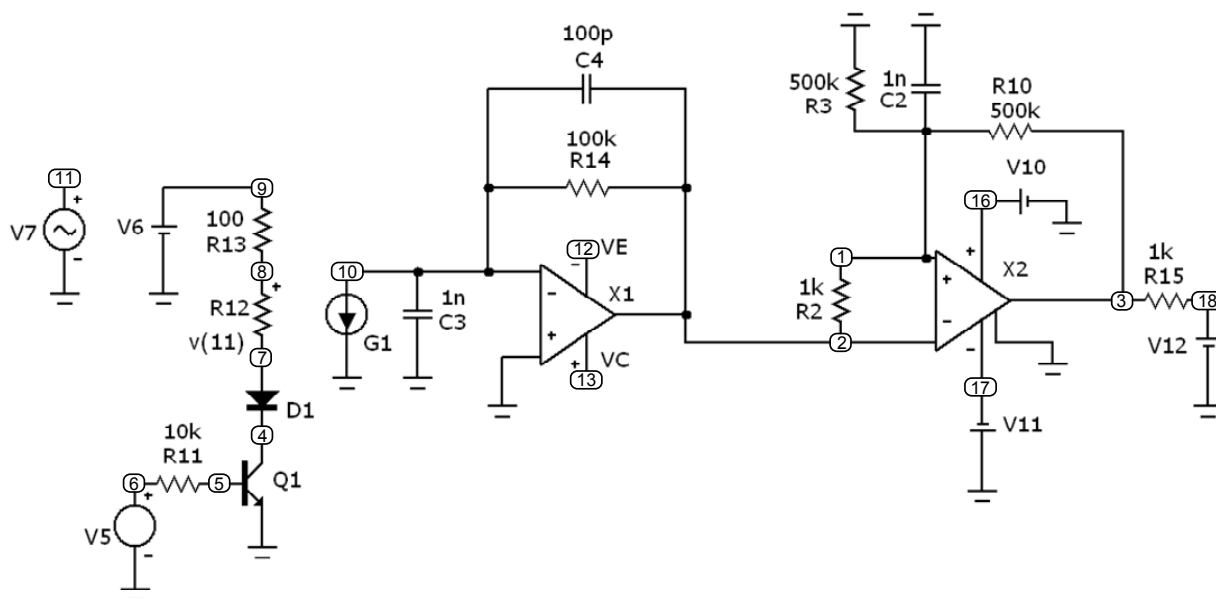


Рис. 3. Электрическая модель оптического канала связи на реальных активных компонентах

Временные диаграммы работы всей схемы соответствуют диаграммам, полученным для схемы канала на идеальных активных компонентах. При этом в результате работы схемы вносятся дополнительные искажения, обусловленные такими неидеальностями ОУ и компаратора, как напряжение смещения нуля и входные токи.

### Результаты моделирования и их обсуждение

Исходя из обозначенной во введении проблемы, касающейся влияния модуляции амплитуды оптического сигнала на погрешность измерений физических величин, на моделях оптического канала связи исследовалась возможность получения максимальной допустимой глубины модуляции опти-

ческого сигнала при максимальной погрешности передачи длительности оптических импульсов, не превышающей 1 %.

На рис. 4 для минимальной частоты следования импульсов 500 Гц показана зависимость допустимой глубины модуляции от длительности импульсов в диапазоне 10 мкс ... 1 мс. Как видно, в канале связи на идеальных активных элементах наблюдается повышенное значение допустимой модуляции сигнала, что объясняется отсутствием влияния неидеальностей активных элементов в приемной части канала на результат измерений. С другой стороны, зависимость 2, соответствующая реальному каналу (с использованием реальных активных компонентов), демонстрирует достаточно высокие

показатели. Значение допустимой глубины модуляции амплитуды оптических импульсов примерно в 30 дБ вполне достаточно для использования канала в реальных информационно-измерительных системах.

На рис. 5 представлены зависимости допустимой глубины модуляции амплитуды от частоты оборотов двигателя при длительности информационных импульсов 1 мс.

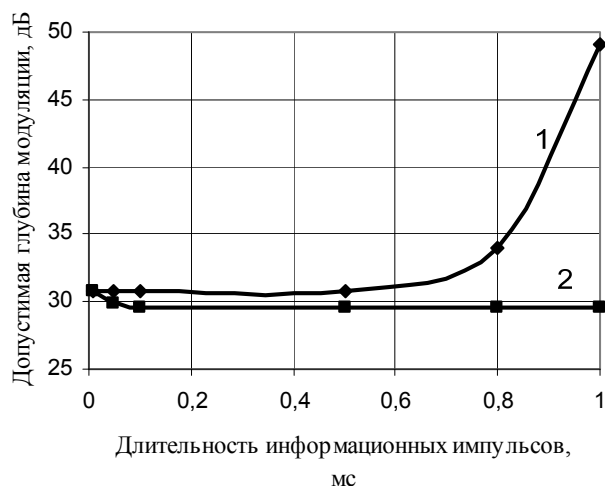


Рис. 4. Зависимость допустимой глубины модуляции амплитуды оптического сигнала от длительности информационных импульсов

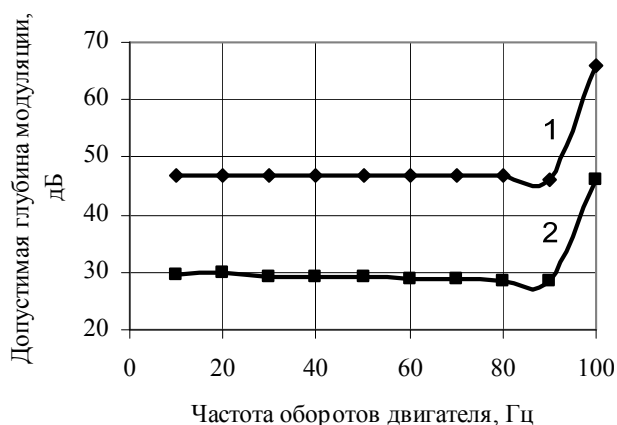


Рис. 5. Зависимость допустимой глубины модуляции амплитуды информационного сигнала от частоты оборотов двигателя

В соответствии с рис. 4 на 1 мс имеет место значительное расхождение результатов моделирования в схемах на идеальных (график 1) и реальных (график 2) активных компонентах. Однако можно отметить, что показатели для схемы на реальных компонентах допускают ее применение в системах

измерений. Допустимая глубина модуляции во всем диапазоне частот оборотов двигателя близка к 30 дБ.

Исследовалась эффективность работы ИФАП на компараторе X2 в схеме на рис. 3 по восстановлению длительности импульсов  $V(2)$  на выходе усилителя фототока, при изменении амплитуды импульсов в диапазоне от 0,1 до 4 вольт (32 дБ). Длительность входных неискаженных импульсов составляла 10 мкс.

В таблице представлены результаты измерений погрешности восстановления длительности информационных импульсов для случаев восстановления сигнала с помощью компаратора с фиксированным порогом срабатывания 0,05 В и при использовании ИФАП.

Амплитуда импульсов в точке 2 модели на рис. 3, В	Относительная погрешность восстановления длительности импульсов, %	
	Компаратор с фиксированным порогом	ИФАП
0,1	0,1	-0,96
0,2	3,71	-0,41
0,4	6,53	-0,11
0,8	9,12	-0,01
1	9,84	0,03
2	12,22	0,09
4	14,61	0,1

Из таблицы видно, что погрешность восстановления длительности при использовании компаратора с фиксированным порогом в диапазоне превышает 10 % и возрастает при увеличении амплитуды импульсов на входе. Это объясняется тем, что с увеличением амплитуды возрастает длительность экспоненциального спада импульса, если измерять ее по фиксированному уровню напряжения.

Также видна высокая эффективность работы ИФАП. Погрешность восстановления временного интервала не превышает 1 %. При этом отрицательное значение погрешности при малых уровнях входного сигнала обусловлено фиксированным нижним порогом срабатывания компаратора, а переход погрешности в область положительных значений при больших уровнях сигнала, скорее

всего, объясняется дискретностью расчетов уровней сигналов по временной оси в моделирующей программе, которая была установлена в пределах 10 нс.

### Заключение

Таким образом, в работе представлены и обоснованы электрические модели оптического канала связи, применяемого в телеметрической системе измерения параметров поршня работающего двигателя внутреннего сгорания. Показано, что с применением идеальных и реальных активных элементов в приемной части канала при погрешности передачи информационного параметра на уровне не более 1 % допустимая глубина модуляции амплитуды оптических импульсов составляет 30 дБ в диапазоне длительностей импульсов 10 мкс ... 1 мс и диапазонов частот оборотов двигателя от минимальных 10 Гц до максимальных 100 Гц, что достаточно для применения в реальных информационно-измерительных системах.

Для повышения допустимой глубины модуляции оптического сигнала в канале связи необходимо выбирать активные элементы в его приемной части из группы прецизионных с минимальными напряжениями смещения нуля и входными токами.

Показана эффективность схемы восстановления амплитуды импульсных сигналов на основе применения компаратора напряжения с адаптивным порогом срабатывания.

### Библиографические ссылки

1. Устройство для исследования поршней двигателей по инфракрасному излучению / В. А. Щеголев и др. // Двигателестроение. 1985. № 10. С. 50–52.
2. Ключников Г. М., Сяктерев В. Н., Кондратьев В. Н. Телеметрическая система с оптическим каналом связи для измерения параметров подвижных деталей // Двигателестроение. 1983. № 2. С. 14–17.
3. Куликов В. А., Сяктерев В. Н. Градуировка автоматизированной системы температурных испытаний поршня двигателя внутреннего сгорания // Вестник Ижевского государственного технического университета. 2012. № 1. С. 92–95.
4. Куликов, В. А., Сяктерев В. Н., Сяктерева В. В. Исследование влияния методических погрешностей на точность измерения темпера-

туры подвижных деталей двигателей с использованием телеметрических систем измерения // Вестник Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова, 2014. – № 4(64). – С. 118–121.

5. Сяктерев В. Н., Сяктерева В. В., Колеватов С. М. Оптический канал связи в системах измерения параметров поршня двигателей внутреннего сгорания // Вестник Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова. 2016. № 3. С. 44–46.

6. Micro-Cap 11 Electronic Circuit Analysis Program User's Guide. URL: <http://www.spectrum-soft.com/down/ug11.pdf> (дата обращения: 06.02.2018).

7. Амелина М. А., Амелин С. А. Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap 8. М. : Горячая линия – Телеком, 2007. 464 с.

8. Куликов В. А., Колеватов С. М. Инерционный формирователь с адаптивным порогом // Информационные технологии в науке, промышленности и образовании : сб. тр. науч.-техн. очно-заоч. регион. конф. (г. Ижевск, 24 мая 2014 г.) / науч. ред. В. А. Куликов. Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2014. С. 276–282.

9. Куликов В. А., Сяктерев В. Н., Колеватов С. М., Селетков С. Г. Моделирование инерционного формирователя с адаптивным порогом // Информационные технологии в науке, промышленности и образовании : сб. тр. науч.-техн. очно-заоч. регион. конф. (г. Ижевск, 23 мая 2015 г.) / науч. ред. В. А. Куликов. Ижевск : Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2015. С. 227–232.

### References

1. Shhegolev V. A. (1985). *Dvigatellestroenie* [Engine building], no. 10, pp. 50-52 (in Russ.).
2. Kljuchnikov G. M., Syakterev V. N., Kondrat'ev V. N. (1983). *Dvigatellestroenie* [Engine building], no. 2, pp. 14-17 (in Russ.).
3. Kulikov V. A., Syakterev V. N. (2012). *Vestnik IzhGTU* [Bulletin of ISTU], no 1, pp. 92-95 (in Russ.).
4. Kulikov V. A., Syakterev V. N., Syaktereva V. V. (2014). *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova* [Bulletin of Kalashnikov ISTU], no 4 (64), pp. 118-121 (in Russ.).
5. Syakterev V. N., Syaktereva V. V., Kolevatov S. M. (2016). *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova* [Bulletin of Kalashnikov ISTU], no 3, pp. 44-46 (in Russ.).
6. *Micro-Cap 11 Electronic Circuit Analysis Program User's Guide* [Micro-Cap 11 Electronic Circuit Analysis Program User's Guide], available

at <http://www.spectrum-soft.com/download/ug11.pdf> (accessed February 06, 2018) (in Russ.).

7. Amelina M. A., Amelin S. A. (2007). *Programma skhemotekhnicheskogo modelirovaniya Micro-Cap 8* [The program circuit simulation Micro-Cap 8]. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom (in Russ.).

8. Kulikov V. A., Kolevatov S. M. (2014). *Inercionnyj formirovatel' s adaptivnym porogom* [Inertia shaper with adaptive threshold]. Proceedings of

the Informacionnye tehnologii v nauke, promyshlennosti i obrazovanii (eds. Kulikova V. A.), pp. 276-282 (in Russ.).

9. Kulikov V. A., Syakterev V. N., Kolevatov S. M., Seletkov S. G. (2015). *Modelirovanie inercionnogo formirovatelja s adaptivnym porogom* [Modeling of inertial shaper with adaptive threshold] Proceedings of the Informacionnye tehnologii v nauke, promyshlennosti i obrazovanii (eds. Kulikova V. A.), pp. 227-232 (in Russ.).

\*\*\*

### Modeling of Optical Communication Channel of Telemetric Measuring System

V. A. Kulikov, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

V. N. Syakterev, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

V. V. Syaktereva, PhD in Engineering, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

*In this paper we propose models of optical communication channel of telemetric measuring system intended for piston thermometry of the running engine of internal combustion. The communication channel is realized between primary and intermediate transducers installed on the piston and the static package for receiving and processing of measuring information of system located outside the engine. The channel turns on the radiator, the photodetector and the scheme of restitution of amplitude of pulse informational signals. Models of a communication channel are presented in the environment of Micro-Cap and realized on ideal and real fissile elements (an operational amplifier and the comparator of tension). Researches of transition processes on models in the mode of the analysis Transient of the Micro-Cap program at information transfer in duration of optical impulses showed that in a communication channel modulation of amplitude of optical impulses up to 30 dB at a transfer error is allowed at no more than 1% error in a frequency range of engine speed from 10 to 100 Hz and duration of impulses from 10 microseconds to 1 ms. The modelled channel can be used in actual telemetering systems of thermometry and other physical properties of internal combustion engines in the course of their pilot studies and operational development.*

**Keywords:** telemetric measuring system, optical communication channel, modulation of amplitude of optical impulses, model operation of a communication channel.

Получено: 26.04.18