

ИССЛЕДОВАНИЕ СХЕМОТЕХНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОПТИЧЕСКОГО ПРИЕМНИКА ДЛЯ СИСТЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ СИГНАЛОВ

Е. С. Дукович, А. В. Светиков

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

В настоящее время для передачи больших объемов информации с высокой скоростью используются волоконно-оптические системы передачи. Они являются наиболее перспективными элементами информационных систем, благодаря уникальным возможностям по пропускной способности и затуханию волоконных световодов, и современному развитию оптических и полупроводниковых технологий. Приемные оптоэлектронные модули являются важными элементами волоконно-оптических систем передачи.

Целью работы является исследование схемотехнической модели оптического приемника на лавинном фотодиоде и объединение всех функциональных узлов в едином программном пакете.

Структурная схема

Конструктивно фотоприемное устройство состоит из фотодиода, осуществляющего преобразование входного оптического сигнала в электрический (фототок) и каскада усилителей, которые осуществляют преобразование и усиление электрического сигнала.

Структурная схема оптического приемника представлена на рис. 1.

Для построения оптического приемника целесообразно использовать лавинный фотодиод APDI-55

(производитель «LasersCom»), т.к. при его использовании достигается максимальная чувствительность (-48 дБм для предаварийного режима работы по критерию BER).

Особенностью работы лавинного фотодиода (ЛФД) являются высокое напряжение обратного смещения, при котором происходит усиление фототока. Ток выходного сигнала ЛФД определяется выражением:

$$I_{\phi} = M \cdot R \cdot P_s \quad (1)$$

где R – внутренняя чувствительность отклика ЛФД при усилении $M = 1$; M – коэффициент умножения ЛФД; P_s – падающая оптическая мощность.

Особенностью ЛФД является повышенная температурная чувствительность коэффициента умножения M . При изменении температуры окружающей среды происходит смещение рабочей точки ЛФД, как следствие, потеря чувствительности приемника. Поэтому необходимо применять схему подстройки напряжения смещения в зависимости от изменения температуры окружающей среды [1].

Моделирование работы схемы подстройки напряжения смещения в зависимости от изменения температуры окружающей среды является одним из ключевых моментов разработки оптического приемника на ЛФД.



Рис.1. Структурная схема оптического приемника

Формирование напряжения смещения

Для формирования напряжения смещения лавинного фотодиода выбрана микросхема LT3571 (производитель Linear Technology), позволяющая задавать напряжение смещения в диапазоне до +75 В. Производитель Linear Technology предлагает собственную программу симулирования «LTspiceIV», в составе которой есть библиотечный файл выбранной микросхемы.

Если известно, что температура при эксплуатации меняется незначительно, то напряжение смещения задается постоянным. Для APDI-55 обратное напряжение смещения рассчитывается по формуле:

$$U_{\text{смещ}} = 0,9 \cdot U_{br} = 0,9 \cdot 43,08 = 38,772 \text{ В} \quad (2)$$

где $U_{br} = 43,08 \text{ В}$ – значение напряжения лавины APDI-55.

При работе в условиях с изменяющейся температурой окружающей среды необходимо вводить температурную коррекцию, заключающуюся в подстройке напряжения смещения в зависимости от изменения температуры окружающей среды. Для вычисления температурного коэффициента воспользуемся следующей формулой [2]:

$$\delta = \frac{U_{br}(25^\circ\text{C} + \Delta T^\circ\text{C}) - U_{br}(25^\circ\text{C})}{\Delta T^\circ\text{C} - U_{br}(25^\circ\text{C})}. \quad (3)$$

Отсюда:

$$U_{br}(25^\circ\text{C} + \Delta T^\circ\text{C}) = \delta(\Delta T^\circ\text{C} - U_{br}(25^\circ\text{C})) + U_{br}(25^\circ\text{C}) \quad (4)$$

где $U_{br}(25^\circ\text{C}) = 43,08 \text{ В}$ – значение напряжения лавины при $T = 25^\circ\text{C}$; $\Delta T^\circ\text{C}$ – отклонение температуры от значения 25°C ; $\delta = 0,1 \text{ \%}/^\circ\text{C}$ – температурный коэффициент напряжения лавины в процентах при отклонении температуры на 1°C

Напряжения лавины при отклонение от значения 25°C на 1°C и на 2°C соответственно:

$$U_{br}(26^\circ\text{C}) = 0,1 \cdot (1 - 43,08) + 43,08 = 38,872 \text{ В}$$

$$U_{br}(27^\circ\text{C}) = 0,1 \cdot (2 - 43,08) + 43,08 = 38,972 \text{ В}$$

Тогда изменение напряжения смещения при изменении температуры составит:

$$\begin{aligned} \frac{dU_{out}}{dT} &= U_{br}(27^\circ\text{C}) - U_{br}(26^\circ\text{C}) = \\ &= 38,972 - 38,872 = 0,1 \text{ В}. \end{aligned}$$

Следовательно, изменение температуры на 1°C приводит к подстройке напряжения смещения на 100 мВ .

Блок термокомпенсации выполнен на р-п-р транзисторах QPЕМТ1. На рис. 2 представлены осциллограммы напряжения смещения при постоянной температуре $+25^\circ\text{C}$ и тока через фотодиод (расчет выполнен для обратного тока $I_{\text{лфд}} = 10 \text{ мА}$ [3]). На рис. 3 представлены осциллограммы напряжения смещения при изменении температуры в диапазоне от $+20^\circ\text{C}$ до $+30^\circ\text{C}$ с шагом 1°C .

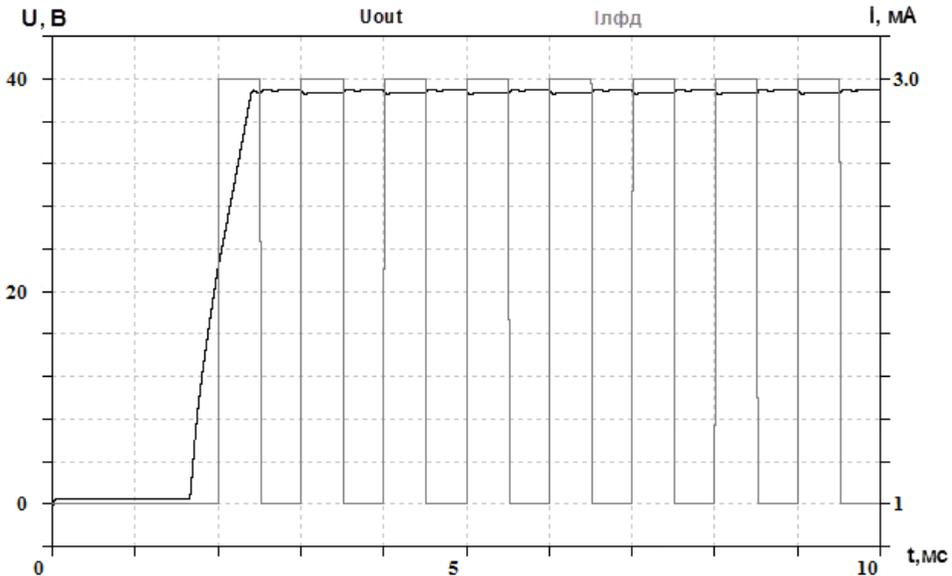


Рис. 2. Осциллограммы напряжения смещения при постоянной температуре 25°C и тока через фотодиод $I_{\text{лфд}} = 2 \text{ мА}$

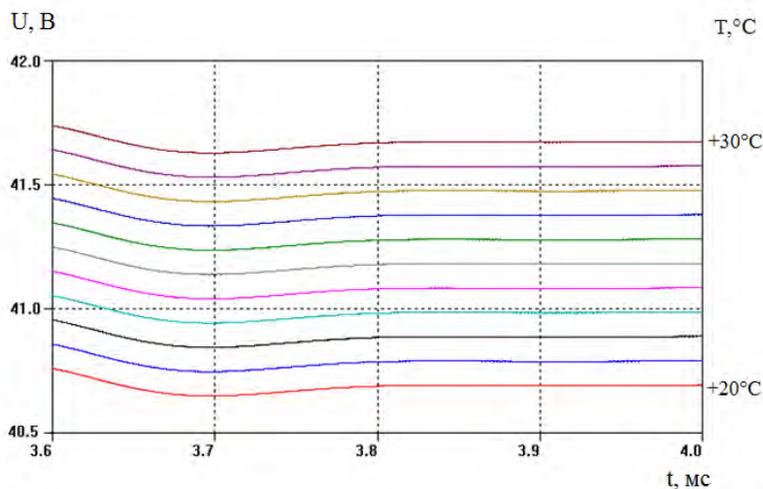


Рис. 3. Осциллограммы напряжения смещения при изменении температуры в диапазоне от +20 °С до +30 °С с шагом 1 °С

Из анализа результатов моделирования следует, что напряжение смещения на лавинном фотодиоде соответствует расчетному значению и составляет ≈ 39 В при температуре +25 °С (рис. 2). Изменение температуры на 1°С приводит к подстройке напряжения смещения приблизительно на 97 мВ (рис. 3), что соответствует расчетам с точностью 3 %.

Моделирование трансимпедансного усилителя

В качестве усилителя фототока выбран трансимпедансный усилитель MAX3963 (производитель «Maxim Integrated Products»), который предназначен для работы в оптоволоконных системах передачи на скоростях до 155 Мбит/с. Преимуществом схемы с трансимпедансным усилителем является высокая чувствительной при большой ширине полосы. Усилитель MAX3963 обладает низкими шумами и имеет полосу пропускания до 180 МГц [4].

При моделировании в программе симулирования «LTspiceIV» в качестве аналога выбран операционный усилитель ОРА657, который применяется, как трансимпедансный усилитель, поскольку имеет низкий уровень шумов.

Рассчитаем выходное напряжение для трансимпедансного усилителя по следующей формуле:

$$U_{\text{вых}} = I \cdot R_{\text{ТИА}} = 8,31 \text{ мВ}, \quad (5)$$

где $I = 378$ нА – амплитудное значение входного тока усилителя MAX3963; $R_{\text{ТИА}} = 22$ кОм – полное сопротивление трансимпедансного усилителя MAX3963.

В качестве входного воздействия при моделировании используется синусоида с частотой:

$$f = B/2 = 125/2 = 62,5 \text{ МГц}, \quad (6)$$

где $B = 125$ Мбит/с – скорость передачи информации.

На рис. 4 представлен график напряжения на выходе ОРА657.

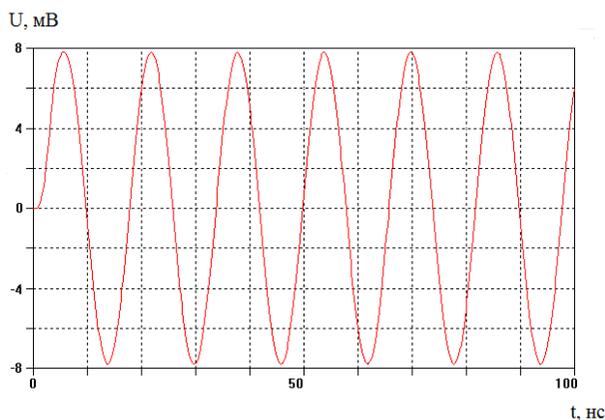


Рис.4. Осциллограмма напряжения на выходе усилителя ОРА657

Из анализа результатов моделирования следует, что напряжение на выходе трансимпедансного усилителя соответствует расчетному значению с точностью 6 %.

Моделирование усилителя напряжения с регулируемым коэффициентом усиления

Для усиления сигнала с выхода трансимпедансного усилителя до необходимо уровня применяется усилитель напряжения с регулируемым коэффициентом усиления AD603 (производитель Analog Devices), который имеет низкий шум, полосу пропускания от 30 до 90 МГц и обеспечивает усиление от -11 дБ до +31 дБ. Регулировка коэффициента усиления осуществляется с помощью переменного резистора. Диапазон изменения управляющего напряжения ($U_{\text{упр}}$) находится в пределах от -600 мВ до 600 мВ [5].

Моделирование работы усилителя AD603 выполнено в программе TINA-TI V9 (Texas Instruments) при разных значениях управляющего напряжения.

По полученным значениям выходного напряжения можно вычислить коэффициент усиления усилителя по напряжению по следующей формуле:

$$K_{усил.} = 20 \lg \left(\frac{U_{вых}}{U_{вх}} \right) \quad (7)$$

где $U_{вх}$ – напряжение на входе усилителя; $U_{вых}$ – напряжение на выходе усилителя.

На рис. 5 приведен пример моделирования линейного усилителя для управляющего напряжения 0 В (Кусил. = 10 дБ).

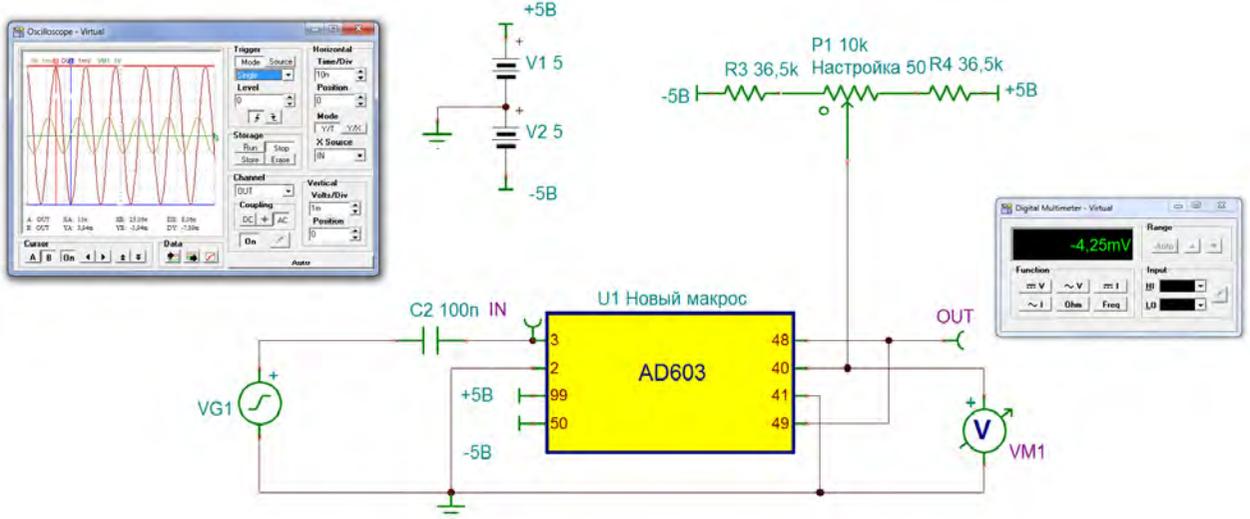


Рис. 5. Схема и результаты моделирования усилителя AD603 в программе TINA-TI V9 (пример для Кусил. = 10 дБ)

Фазовый сдвиг сигнала на выходе связан с временной задержкой при прохождении сигнала через усилитель.

На рис. 6 представлены графики зависимости коэффициента усиления от управляющего напряжения. Пунктирной линией обозначен график зависимости коэффициента усиления от управляющего напряжения, рассчитанный по результатам моделирования; сплошной – график зависимости коэффициента усиления от управляющего напряжения, приведенный в документации на усилитель AD603 [5].

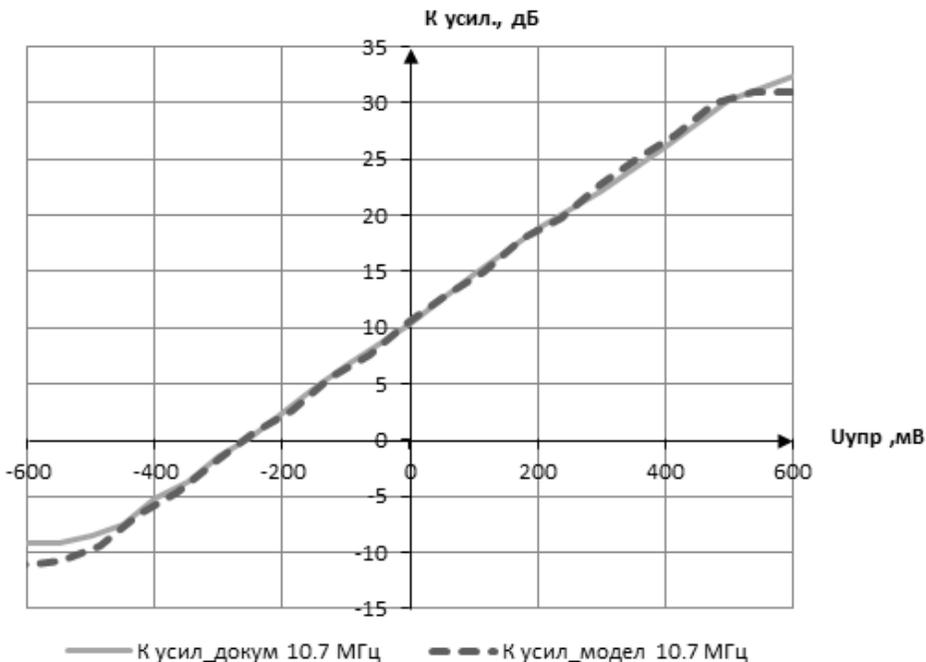


Рис. 6. Графики зависимости коэффициента усиления усилителя AD603 от управляющего напряжения

Из представленных на рис. 6 графиков следует, что значения коэффициента усиления в диапазоне от -5 дБ до $+30$ дБ, полученные при моделировании, с высокой точностью ($\leq 4\%$) совпадают с данными из документации на усилитель AD603 [5].

Модель оптического приемника в программном пакете LTspiceIV

Элементная база функциональных узлов относится к разным производителям, поэтому существует сложность объединения их в одной программе для моделирования работоспособности оптического приемника в целом. Для моделирования схемы оптического приемника в целом выбрана программа LTspiceIV, так как в ней промоделирована большая часть узлов оптического приемника: трансимпедансный усилитель, блок задания смещения ЛФД и блок контроля температуры. Для моделирования необходимо добавить библиотеку линейного усилителя AD603.

Схемотехническая модель оптического приемника представлена на рис. 7. На вход схемы подается синусоидальный сигнал, имитирующий сигнал, прошедший через фотодиод с параметрами: $I = 267$ нА, $f = 62,5$ МГц. Моделирование проводилось в режиме с изменяющейся температурой окружающей среды в диапазоне от $+20$ °C до $+30$ °C с шагом 1 °C.

На рис. 8 и 9 представлены осциллограммы сигналов на выходе оптического приемника при разных значениях коэффициента усиления усилителя AD603.

Из представленного графика следует, что выходной сигнал соответствует результатам моделирования линейного усилителя AD603 в программе TINA-TI. В целом происходит корректное прохождение и преобразование входного информационного сигнала. При изменении температуры на 1 °C происходит изменение выходного напряжения приблизительно на $0,1$ мВ/°C, следовательно, блок термокомпенсации работает корректно (рис. 10).

Представленная модель оптического приемника в программе LTSpiceIV реализована корректно, что подтверждается результатами моделирования для входного оптического сигнала -48 дБм ($I = 267$ нА) для скорости передачи 125 Мбит/с в режиме с изменяющейся температурой окружающей среды в диапазоне от $+20$ °C до $+30$ °C с шагом 1 °C.

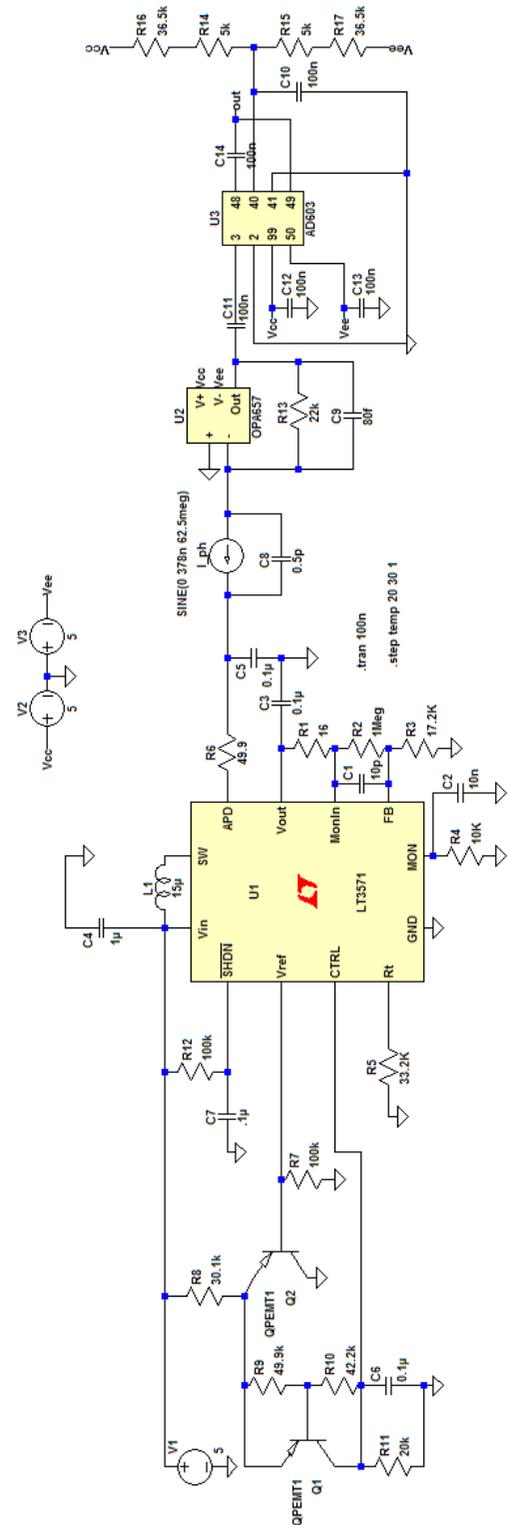


Рис. 7. Модель оптического приемника с температурной коррекцией напряжения смещения ЛФД

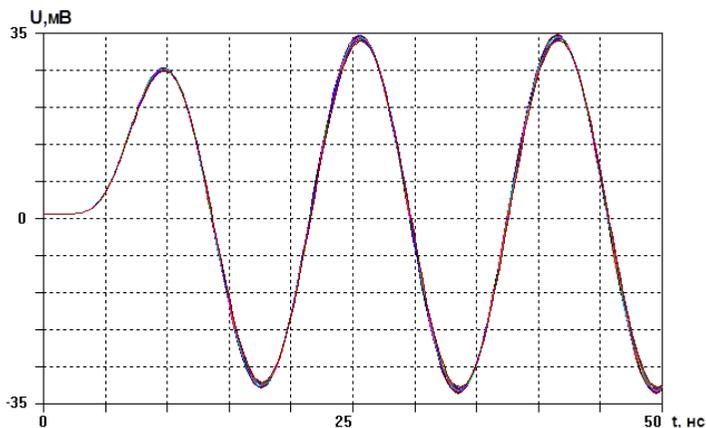


Рис. 8. Осциллограммы напряжения на выходе оптического приемника при изменении температуры в диапазоне от +20 °C до +30 °C с шагом 1 °C для Кусил.=10 дБ ($U_{упр.}= 0$ мВ)

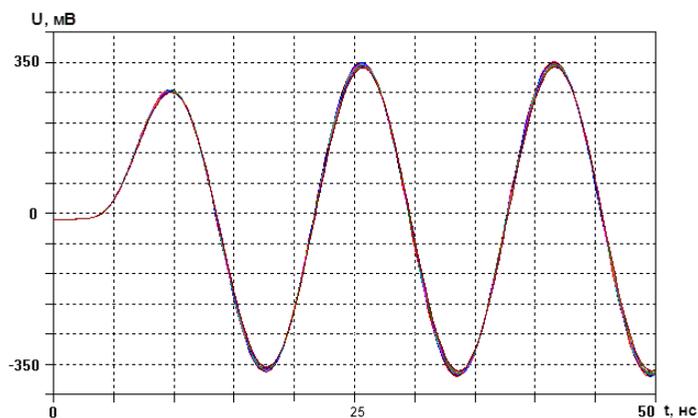


Рис. 9. Осциллограммы напряжения на выходе оптического приемника при изменении температуры в диапазоне от +20 °C до +30 °C с шагом 1 °C для Кусил.=32 дБ ($U_{упр.}= 600$ мВ)

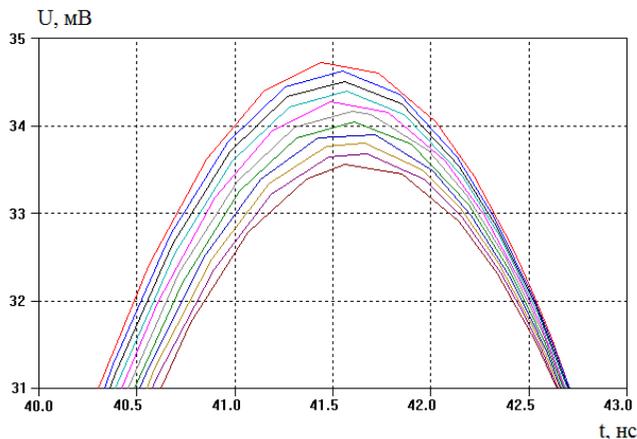


Рис. 10. Увеличенная осциллограммы напряжения на выходе оптического приемника при изменении температуры в диапазоне от +20 °C до +30 °C с шагом 1 °C для Кусил.=10 дБ ($U_{упр.}= 0$ мВ)

Заключение

Представленная модель оптического приемника позволяет выполнять анализ параметров информационного сигнала в контрольных точках и на выходе схемы с точностью единицы процентов, что подтвер-

ждается результатами моделирования при минимальном уровне входного сигнала и моделированием режима температурной коррекции напряжения смещения.

Разработанную схемотехническую модель можно использовать для моделирования более сложных компонентов волоконно-оптических систем передачи.

Литература

1. LT3571 75V DC/DC Converter for APD Bias. Applications information // Linear Technology.

2. Complete APD Bias Solution in 60mm² with On-the-Fly Adjustable Current Limit and Adjustable VAPD // Linear Technology Magazine. March 2009 г. С. 27–29.

3. Технические характеристики LT3571.

4. 155 Mbps preamplifier for FDDI and ATM LAN fiber optic receivers.

5. Low noise, 90 MHz variable gain amplifier AD603. Applications information // Analog Devices.