

DR. BOB DAVIDOV

Система термостатирования на базе USB интерфейса Lcard E14-440 (S-function)

Цель работы: Освоить канал связи среды разработки системы управления Simulink (S-function CPP DLL) с внешней средой компьютера (USB Lcard E14-440) для построения систем реального времени.

Задача работы: Построить действующую систему термостатирования на базе модели Simulink и интерфейса S-function.

Приборы и принадлежности: Simulink, USB устройство ввода/вывода E14-440, Датчик температуры; Твердотельное реле 10А/240V; Нагревательный элемент от 60 до 2000 Вт. Персональный компьютер.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

В работе освещаются следующие темы.

- Структурная схема системы термостатирования
- Внешние компоненты системы термостатирования
- Структура S функции simulink
- Пример S функции взаимодействия simulink с USB модулем E14-440
- Пример компиляции S-функции
- Настройка simulink модели системы термостатирования на работу в реальном времени
- Вызов S-функции в simulink

СТРУКТУРНАЯ СХЕМА СИСТЕМЫ ТЕРМОСТАТИРОВАНИЯ

Взаимодействие среды разработки Simulink с USB модулем ввода –вывода через S-функцию поясняется на примере реальной системы термостатирования включающей виртуальные (программные) модули, аппаратные средства и физические компоненты системы. Структурная схема примера системы термостатирования показана на Рис. 1. Ее виртуальная часть (модель Simulink) включает датчик температуры, фильтр, блок рассогласования температуры, регулятор, реле. Физические компоненты – это USB модуль ввода вывода E14-440, твердотельное реле PF240D25, лампа накаливания и датчик температуры LM 335. Связь компьютерной модели с внешними физическими устройствами выполнена через блок S-функции модели и C++ динамические библиотеки модуля E14-440 (см. Рис. 2)

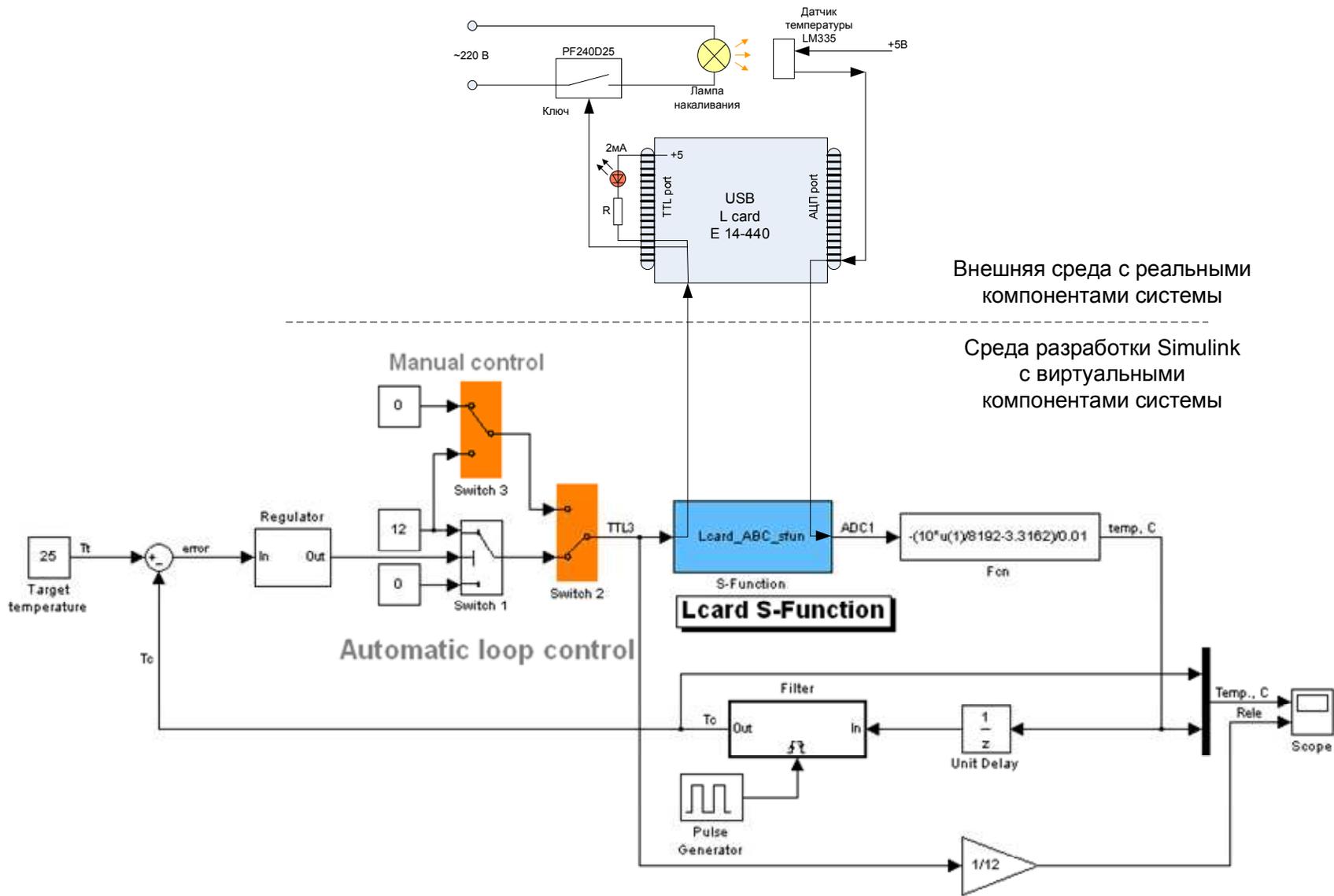


Рис. 1. Структурная схема системы термостатирования

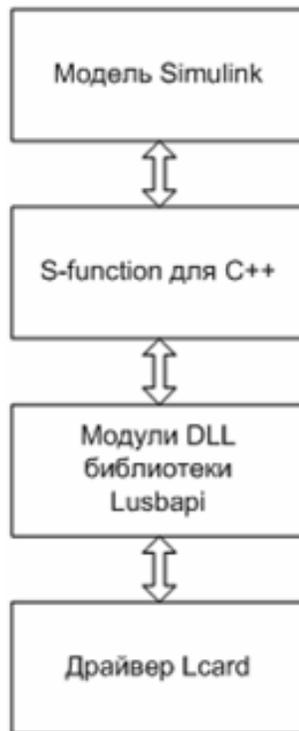


Рис. 2. Структура программного шлюза данных Модель Simulink – Модуль Lcard.

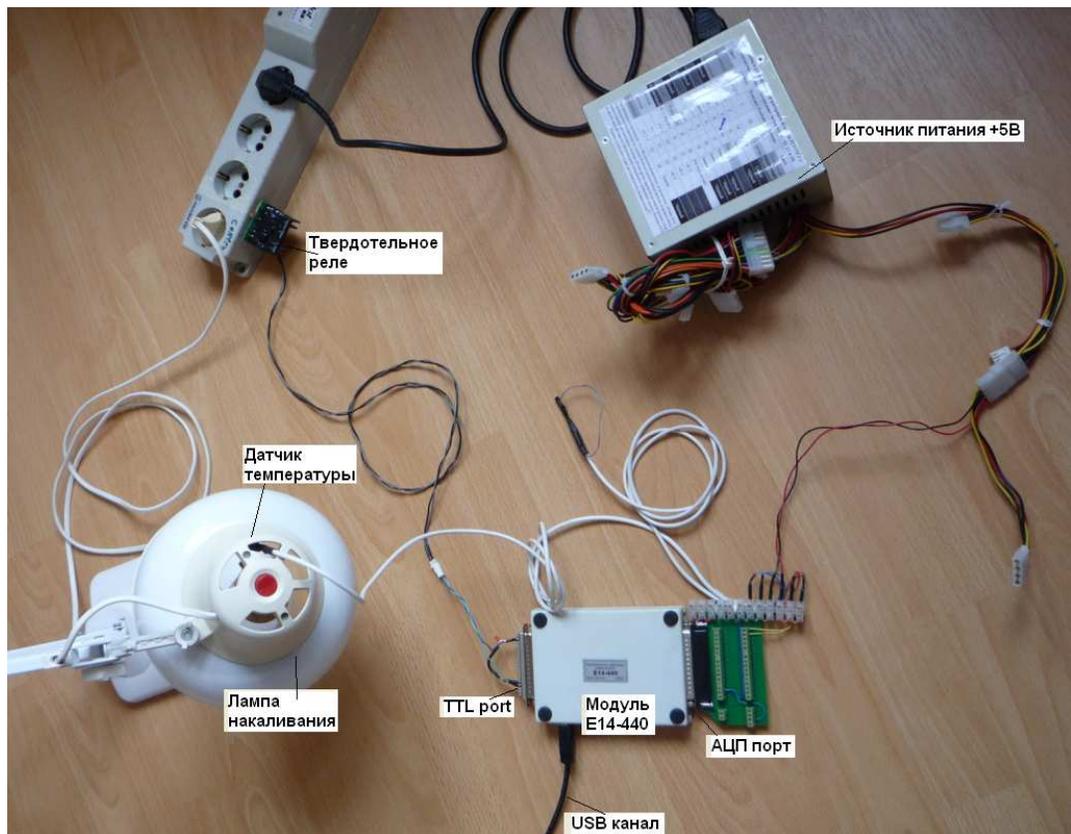


Рис. 3. Физические компоненты системы термостатирования.

ВНЕШНИЕ КОМПОНЕНТЫ СИСТЕМЫ ТЕРМОСТАТИРОВАНИЯ

Модуль E14-440 (Рис. 4) является универсальным программно-аппаратным устройством для использования со стандартной последовательной шиной **USB** и предназначен для построения многоканальных измерительных систем ввода, вывода и обработки аналоговой и цифровой информации в составе персональных IBM-совместимых компьютеров. Модуль *E14-440* внесен в Государственный реестр средств измерений.



Рис. 4. Внешний вид модуля E14-440.

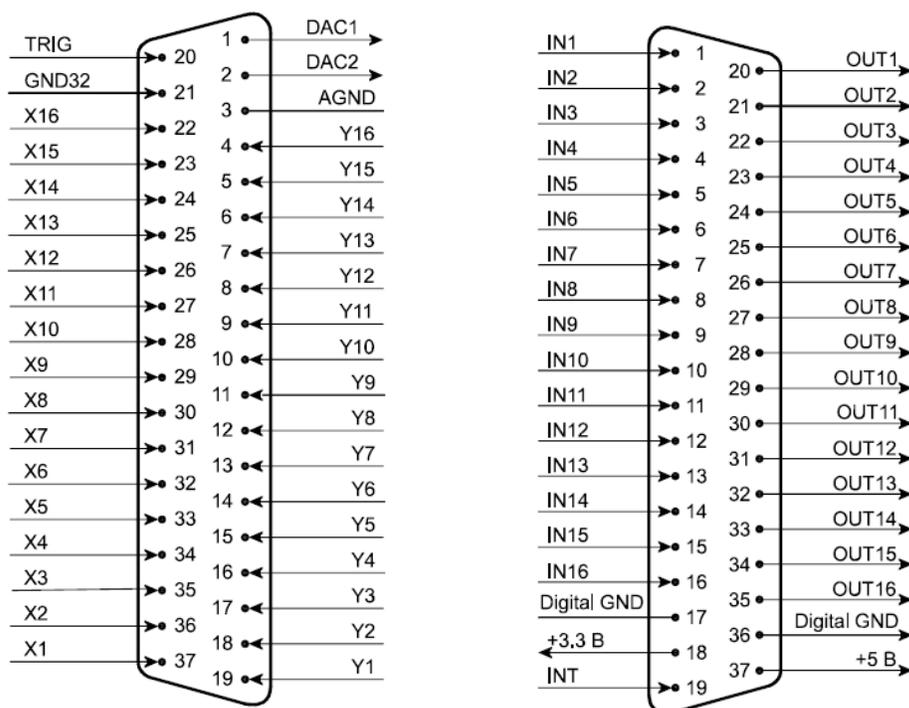


Рис. 5. Внешние разъемы модуля E14-440 (аналоговый – слева, цифровой - справа).

Твердотельное реле PF240D25

Напряжение нагрузки	12 .. 280 VAC
Ток нагрузки	$\leq 10\text{A}$, до 25 А (при охлаждении сильным потоком воздуха)
Максимальное время включения	10 мс (AC цикл), 1/2 DC цикла
Входное напряжение	3 .. 15 VDC
Максимальное напряжение включения	3 VDC
Минимальное напряжение выключения	1 VDC
Номинальное входное сопротивление	300 Ом
Входной ток при номинальном напряжении	15 мА DC

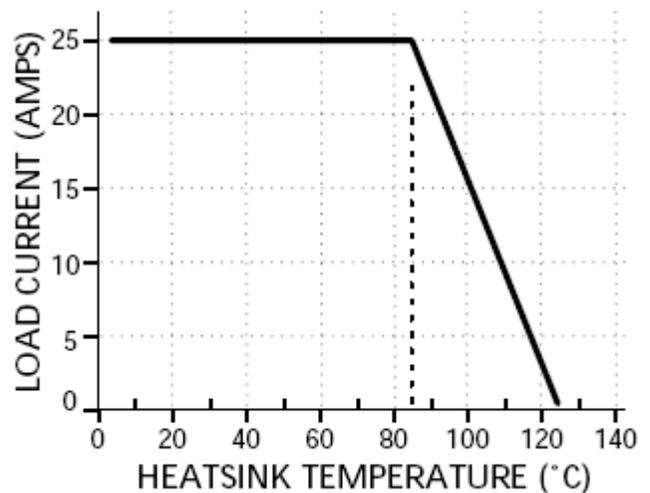


Рис. 7. Спецификация твердотельного реле PF240D25.

СТРУКТУРА S ФУНКЦИИ SIMULINK

S-function - оболочка CPP программы для работы в среде Simulink содержит следующие основные функции.

- static void mdlInitializeSizes(SimStruct *S)
Определяет S-function, задает характеристики блока: количество входных и выходных портов, состояния и т.д.
- static void mdlInitializeSampleTimes(SimStruct *S)
Эта функция используется, чтобы определить шаг моделирования для S-функции. Необходимо установить тот же шаг как и в функции ssSetNumSampleTimes.
- static void mdlStart(SimStruct *S)
Эта функция вызывается один раз при запуске модели. Чтобы минимизировать время чтения/записи данных модуля в эту функцию целесообразно включить операции библиотеки Lusbari по установке связи с модулем E14-440.

```
{GetDllVersion;      CreateLInstance;      OpenLDevice;      GetModuleHandle;  
GetModuleName;      GetUsbSpeed;          LOAD_MODULE;      TEST_MODULE;  
GET_MODULE_DESCRIPTION; GET_ADC_PARS; SET_ADC_PARS; ENABLE_TTL_OUT}
```

- mdlOutputs(SimStruct *S, int_T tid)
Здесь выполняются операции чтения и записи в порты блока S-function. Сюда включены операции чтения АЦП (ADC_SAMPLE) и записи TTL сигналов (TTL_OUT) модуля E14-440
- mdlGetSimState(SimStruct* S)
{
return mxCreateDoubleScalar(0);
}
- mdlSetSimState(SimStruct* S, const mxArray* ma)
{
}
- mdlTerminate(SimStruct *S)
Эта функция выполняет необходимые операции после окончания моделирования. В нашем случае, выполняются функции которые отключают модуль E14-440 (ENABLE_TTL_OUT; ReleaseInstance)

ПРИМЕР S ФУНКЦИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ SIMULINK С USB МОДУЛЕМ E14-440

Файл: Lcard_ABC_sfun.cpp

```
// Lcard_ABC_sfun.cpp
// reads ADC ("control" port), pass the results to the S-function output
// reads S-function input, sent it to the Lcard TTL output, for example,
// when input is 0/3 the first and second TTL outputs is 0 or 1,
// when input is 0/1 TTL1 output is 0/1 TTL2 output is 0,
// when input is 0/2 TTL1 output is 0 TTL2 output is 0/1
// *****
// To build this mex function in MatLAB use: mex Lcard_ABC_sfun.cpp Lusbapi.lib
// Lusbapi.dll must be in folder with MDL file containing Lcard_ABC_sfun.mexw32
// *****

#define S_FUNCTION_LEVEL 2
// *****
#define S_FUNCTION_NAME Lcard_ABC_sfun // **** MUST be named as MEX function
// *****
#include "Lusbapi.h" // заголовочный файл библиотеки Lusbapi

// Need to include simstruc.h for the definition of the SimStruct and
// its associated macro definitions.
#include "simstruc.h"

#define IS_PARAM_DOUBLE(pVal) (mxIsNumeric(pVal) && !mxIsLogical(pVal) &&\
!mxIsEmpty(pVal) && !mxIsSparse(pVal) && !mxIsComplex(pVal) && mxIsDouble(pVal))

#define CHANNELS_QUANTITY (0x1)

DWORD DllVersion; // версия библиотеки
ILE440 *pModule; // указатель на интерфейс модуля
MODULE_DESCRIPTION_E440 md; // структура с информацией о модуле
HANDLE ModuleHandle; // дескриптор устройства
char ModuleName[7]; // название модуля
BYTE UsbSpeed; // скорость работы шины USB
MODULE_DESCRIPTION_E440 ModuleDescription; // структура с полной информацией о
модуле
```

```

ADC_PARS_E440 ap; // структура параметров работы АЦП модуля

WORD ReadThreadErrorNumber; // номер ошибки при выполнении сбора данных

SHORT ADC_control = 0x21; // First ADC, +/-10V, ADC mode: 1 == 32GND
SHORT AdcSample; // отсчёты АЦП

WORD TTL_16_Input; //Input of 16 TTL

static void mdlInitializeSizes(SimStruct *S)
// The sizes information is used by Simulink to determine the S-function
// block's characteristics (number of inputs, outputs, states, etc.).
{
    // No expected parameters
    ssSetNumSFcnParams(S, 0);

    // Parameter mismatch will be reported by Simulink
    if (ssGetNumSFcnParams(S) != ssGetSFcnParamsCount(S)) {
        return;
    }

    // Specify I/O
    if (!ssSetNumInputPorts(S, 1)) return;
    ssSetInputPortWidth(S, 0, DYNAMICALLY_SIZED);
    ssSetInputPortDirectFeedThrough(S, 0, 1);
    if (!ssSetNumOutputPorts(S,1)) return;
    ssSetOutputPortWidth(S, 0, DYNAMICALLY_SIZED);

    ssSetNumSampleTimes(S, 1);

    // Reserve place for C++ object
    ssSetNumPWork(S, 1);

    // ssSetSimStateCompliance(S, USE_CUSTOM_SIM_STATE);

    ssSetOptions(S,
                 SS_OPTION_WORKS_WITH_CODE_REUSE |
                 SS_OPTION_EXCEPTION_FREE_CODE);
}

static void mdlInitializeSampleTimes(SimStruct *S)
// This function is used to specify the sample time(s) for your
// S-function. You must register the same number of sample times as
// specified in ssSetNumSampleTimes.
{
    ssSetSampleTime(S, 0, INHERITED_SAMPLE_TIME);
    ssSetOffsetTime(S, 0, 0.0);
    ssSetModelReferenceSampleTimeDefaultInheritance(S);
}

#define MDL_START
static void mdlStart(SimStruct *S)
// This function is called once at start of model execution. If you
// have states that should be initialized once, this is the place to do it.
{
    // *****

```

```

// Start of Lcard Connection
// *****
WORD i;

// check version of used Lusbapi.dll library
if((DllVersion = GetDllVersion()) != CURRENT_VERSION_LUSBAPI)
{
    char String[128];
    printf(String, " Lusbapi.dll Version Error!!!\n   Current: %lu.%lu.
Required: %lu.%lu",
           DllVersion >> 0x10, DllVersion & 0xFFFF,
           CURRENT_VERSION_LUSBAPI >> 0x10, CURRENT_VERSION_LUSBAPI &
0xFFFF);
}
//     else printf(" Lusbapi.dll Version --> OK\n");

// получим указатель на интерфейс модуля
pModule = static_cast<ILE440 *>(CreateLInstance("e440"));
if(!pModule) {mexErrMsgIdAndTxt("MATLAB:mexcpp:modintf", " Module Interface
--> Bad");
}
//     else printf(" Module Interface --> OK\n");

// попробуем обнаружить модуль E14-440 в первых
MAX_VIRTUAL_SLOTS_QUANTITY_LUSBAPI виртуальных слотах
for(i = 0x0; i < MAX_VIRTUAL_SLOTS_QUANTITY_LUSBAPI; i++) if(pModule->
OpenLDevice(i)) break;
// что-нибудь обнаружили?
if(i == MAX_VIRTUAL_SLOTS_QUANTITY_LUSBAPI)
    printf(" OpenLDevice(%u) --> WRONG\n", i);
//     else printf(" OpenLDevice(%u) --> OK\n", i);

// попробуем прочитать дескриптор устройства
ModuleHandle = pModule->GetModuleHandle();
if(ModuleHandle == INVALID_HANDLE_VALUE)
    printf(" GetModuleHandle() --> Bad\n");
//     else printf(" GetModuleHandle() --> OK\n");

// прочитаем название модуля в обнаруженном виртуальном слоте
if(!pModule->GetModuleName(ModuleName))
    printf(" GetModuleName() --> Bad\n");
//     else printf(" GetModuleName() --> OK\n");

// проверим, что это 'E14-440'
if(strcmp(ModuleName, "E440"))
    printf(" The module is not 'E14-440'\n");
//     else printf(" The module is 'E14-440'\n");

// попробуем получить скорость работы шины USB
if(!pModule->GetUsbSpeed(&UsbSpeed))
    printf(" GetUsbSpeed() --> Bad\n");
//     else printf(" GetUsbSpeed() --> OK\n");
// теперь отобразим скорость работы шины USB
//     printf("   USB is in %s\n", UsbSpeed ? "High-Speed Mode (480 Mbit/s)"
: "Full-Speed Mode (12 Mbit/s)");

// теперь попробуем загрузить из соответствующего ресурса

```

```

// библиотеки Lusbari код драйвера LBIOS
if(!pModule->LOAD_MODULE())
    printf(" LOAD_MODULE() --> Bad\n");
//     else printf(" LOAD_MODULE() --> OK\n");

// проверим загрузку модуля
if(!pModule->TEST_MODULE())
    printf(" TEST_MODULE() --> Bad\n");
//     else printf(" TEST_MODULE() --> OK\n");

// получим информацию из ППЗУ модуля
if(!pModule->GET_MODULE_DESCRIPTION(&ModuleDescription))
    printf(" GET_MODULE_DESCRIPTION() --> Bad\n");
else printf(" E14-440 (s/n %s) is READY TO WORK\n",
md.Module.SerialNumber);

// *****
// далее располагаются функции для непосредственного управления модулем

// получим текущие параметры работы АЦП
if(!pModule->GET_ADC_PARS(&ap))
    printf(" GET_ADC_PARS() --> Bad\n");
//     else printf(" GET_ADC_PARS() --> OK\n");

// установим желаемые параметры работы АЦП
ap.IsCorrectionEnabled = true; // разрешим корректировку
данных на уровне драйвера DSP
ap.InputMode = NO_SYNC_E440; // обычный сбор данных безо
всякой синхронизации ввода
ap.ChannelsQuantity = CHANNELS_QUANTITY; // один активный канал

// формируем управляющую таблицу
ap.ControlTable[0] = (WORD)(ADC_control);

ap.AdcRate = 100.0; // частота
работы АЦП в кГц (max 400.0)
ap.InterKadrDelay = 0.0; // межкадровая
задержка в мс
ap.AdcFifoBaseAddress = 0x0; // базовый адрес FIFO
буфера АЦП в DSP модуля
ap.AdcFifoLength = MAX_ADC_FIFO_SIZE_E440; // длина FIFO буфера АЦП в
DSP модуля

// будем использовать фирменные калибровочные коэффициенты, которые
хранятся в ППЗУ модуля
ap.AdcOffsetCoefs[0] = ModuleDescription.Adc.OffsetCalibration[0];
ap.AdcScaleCoefs[0] = ModuleDescription.Adc.ScaleCalibration[0];

// передадим требуемые параметры работы АЦП в модуль
if(!pModule->SET_ADC_PARS(&ap))
    printf(" SET_ADC_PARS() --> Bad\n");

// разрешение цифровых выходных линий
if(!pModule->ENABLE_TTL_OUT(TRUE)) printf("\n\n TTL OUT PERMISSION -->
Bad\n");

// *****

```

```

        // End of Lcard Connect
        // *****
    }

static void mdlOutputs(SimStruct *S, int_T tid)
//   In this function, you compute the outputs of your S-function block.
{
    // Get data addresses of I/O
    InputRealPtrsType u = ssGetInputPortRealSignalPtrs(S,0);
    real_T *y = ssGetOutputPortRealSignal(S, 0);
    // *****
    // Read/Write Lcard
    // *****
    // вывод на внешние цифровые линии 0x0000 .. 0xFFFF / медленная операция
    (нес. десятков Гц)
    if(!pModule->TTL_OUT((WORD)static_cast< int >(*u[0]))) printf("\n\n TTL
OUTPUT --> Bad\n");

    if(!pModule->ADC_SAMPLE(&AdcSample, (WORD)(ADC_control)))
        printf("\n\n ADC_SAMPLE(, 0) --> Bad\n");
        // передача АЦП сигнала в выходной порт S-function
    // *****
    //   End of Read/Write Lcard
    // *****
    y[0] = AdcSample;
}

/* Define to indicate that this S-Function has the mdlG[S]etSimState methods */
#define MDL_SIM_STATE

static mxArray* mdlGetSimState(SimStruct* S)
{
// see ..\MATLAB\R2012a\simulink\src\sfun_cppcount_cpp.cpp and
sfun_cppcount_cpp.h
    return mxCreateDoubleScalar(0);
}

static void mdlSetSimState(SimStruct* S, const mxArray* ma)
{
// see ..\MATLAB\R2012a\simulink\src\sfun_cppcount_cpp.cpp and
sfun_cppcount_cpp.h
}

static void mdlTerminate(SimStruct *S)
//   In this function, you should perform any actions that are necessary
//   at the termination of a simulation. For example, if memory was
//   allocated in mdlStart, this is the place to free it.
{
    // Перевод цифровых выходных линий в третье, высокоимпедансное, состояние
    if(!pModule->ENABLE_TTL_OUT(FALSE)) printf("\n\n TTL OUT PERMISSION -->
Bad\n");

    //*****
    // Disconnect Lcard
    //*****
    //освободим интерфейс модуля

```

```

printf("\n\n");
if(!pModule->ReleaseLInstance())
{
    printf(" ReleaseLInstance() --> Bad\n");
}
else
{
    printf(" ReleaseLInstance() --> OK\n");
    // обнулим указатель на интерфейс модуля
    pModule = NULL;
}
//*****
// End of Lcard disconnection
//*****
}

// Required S-function trailer
#ifdef MATLAB_MEX_FILE /* Is this file being compiled as a MEX-file? */
#include "simulink.c" /* MEX-file interface mechanism */
#else
#include "cg_sfuns.h" /* Code generation registration function */
#endif

```

ПРИМЕР КОМПИЛЯЦИИ S-ФУНКЦИИ

S-функция C++ должна быть откомпилирована в `mexw32` файл который вызывается соответствующим блоком Simulink модели.

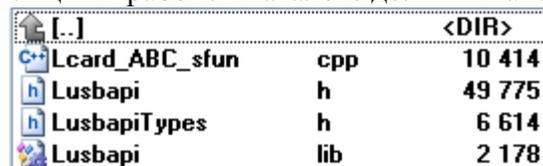
Откомпилировать C++ S-функцию можно командой МатЛАБ:

```
>> mex Lcard_ABC_sfuns.cpp Lusbapi.lib
```

```
>>
```

ВНИМАНИЕ!

1. Команды `mex` для `Lcard_ABC_sfuns.cpp` выполнялась в MATLAB R2012a.
2. Для успешной компиляции в рабочем каталоге должны находиться следующие файлы:

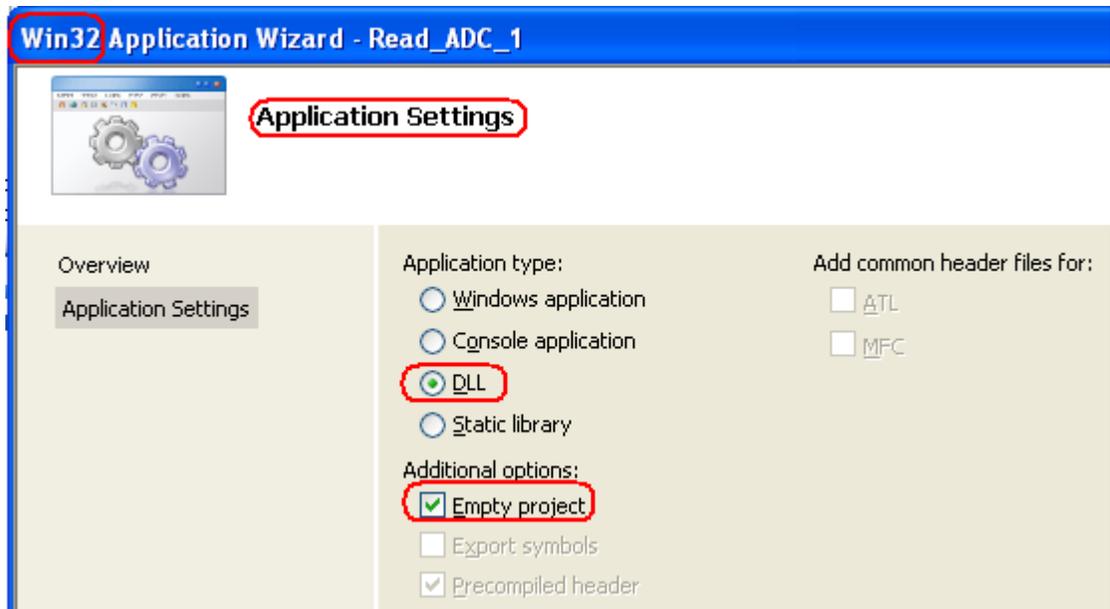


[.]	<DIR>		
C++	Lcard_ABC_sfuns	cpp	10 414
h	Lusbapi	h	49 775
h	LusbapiTypes	h	6 614
lib	Lusbapi	lib	2 178

В результате компиляции в рабочем каталоге должен появиться файл `Lcard_ABC_sfuns.mexw32`

Построить DLL `mexw32` можно и в среде программирования Microsoft Visual C++ в следующей последовательности (в примере использовалась среда Visual Studio 2008).

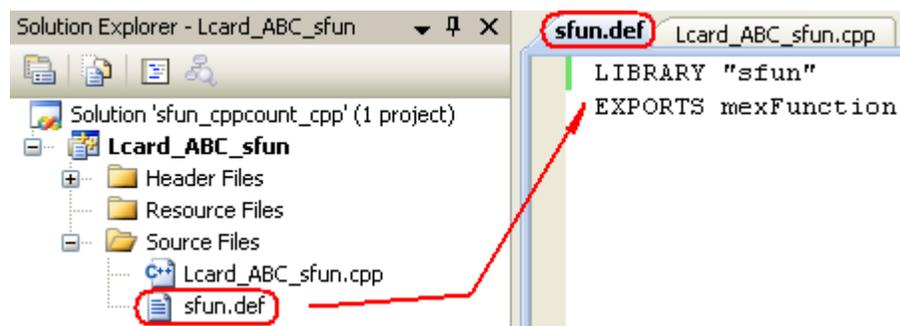
1. В среде Microsoft Visual C++ Создайте новый “пустой” (Empty) проект Win32 DLL библиотеки в рабочей папке, например, `Read_ADC_1`



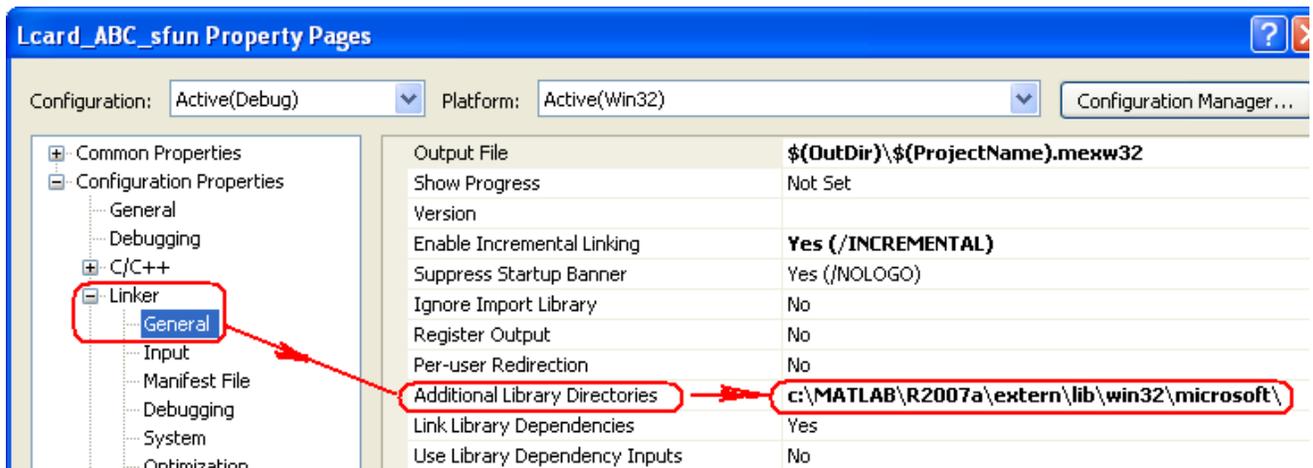
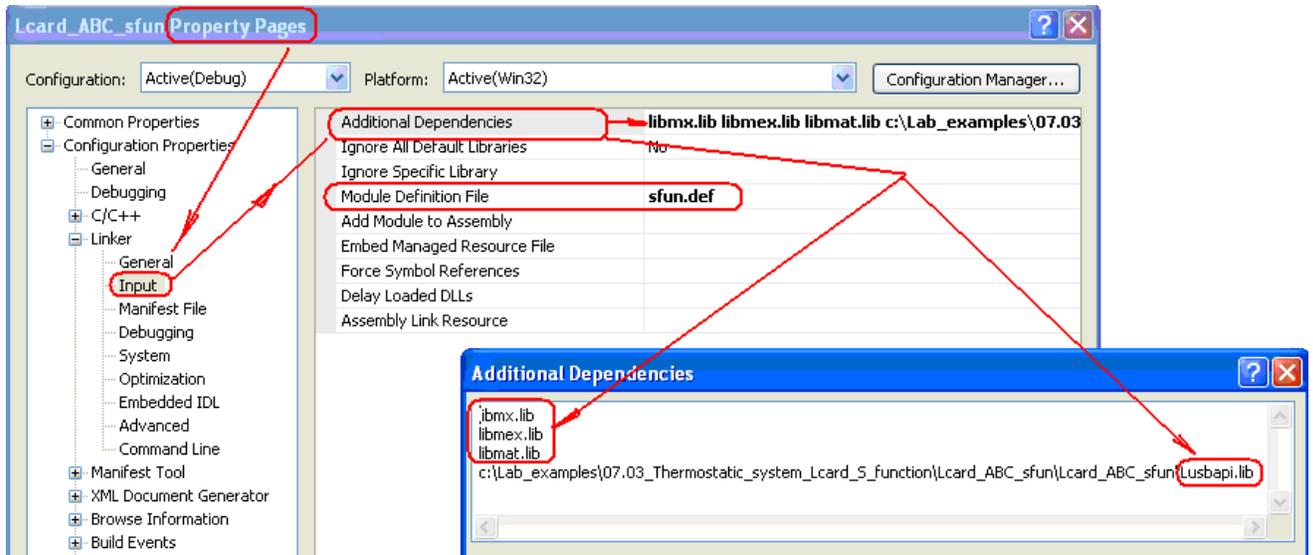
2. Вставьте в проект S-функцию – программу `Lcard_ABC_sfun.cpp`



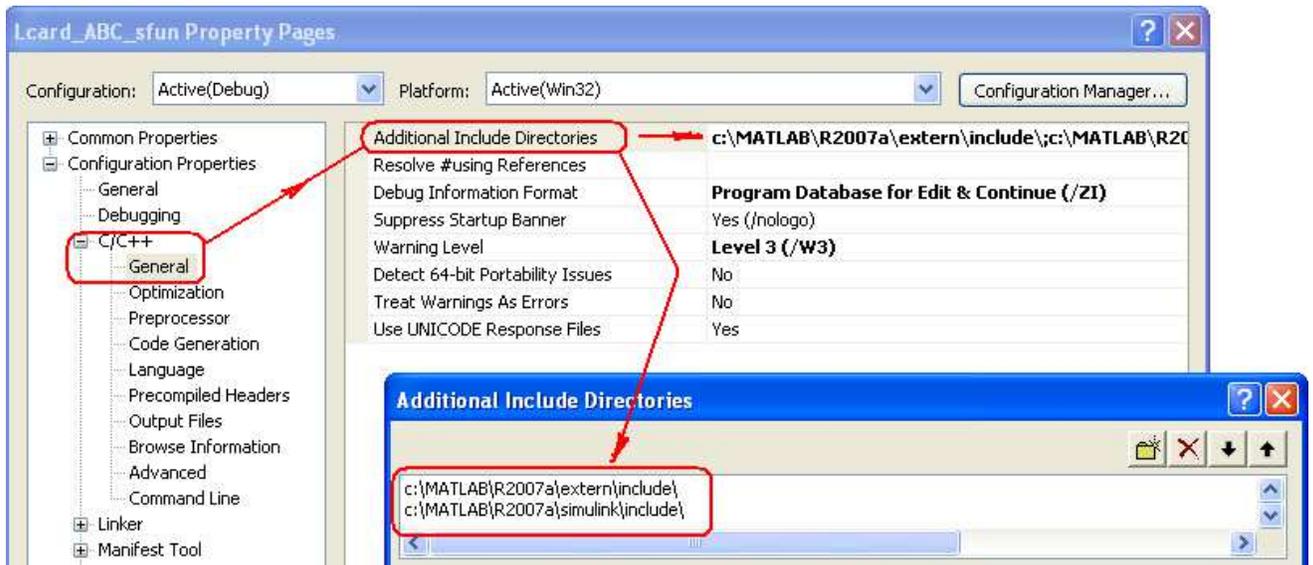
3. Включите в проект новый *.def файл содержащий:
LIBRARY "имя файла"
EXPORTS mexFunction //-- for a C MEX-file



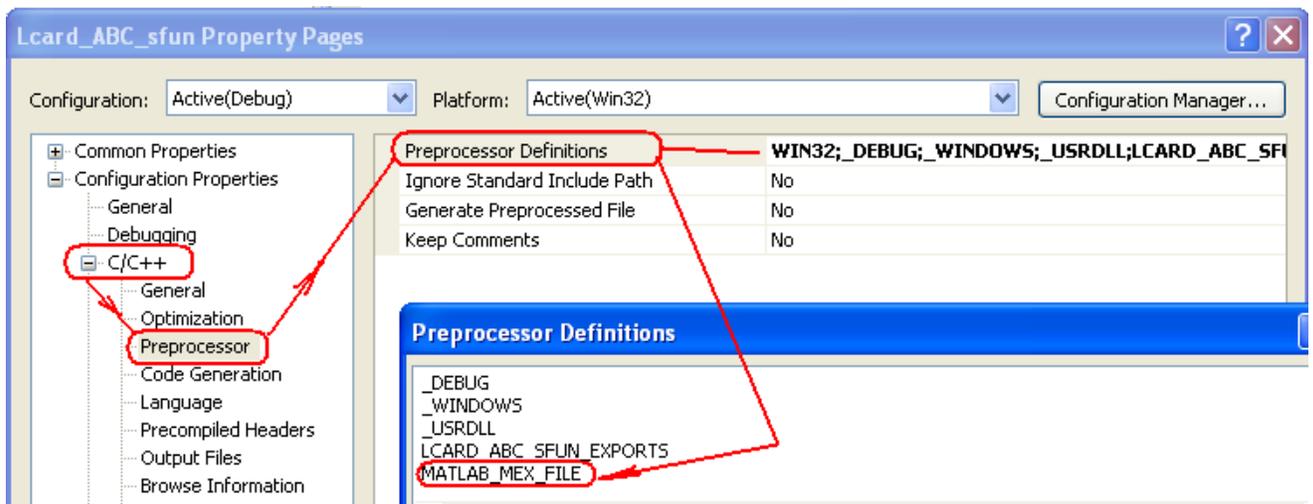
4. Подключите к проекту заголовочные файлы библиотеки модуля E14-440 **Lusbapi.h** и **LusbapiTypes.h** и убедитесь, что def файл подключен к проекту



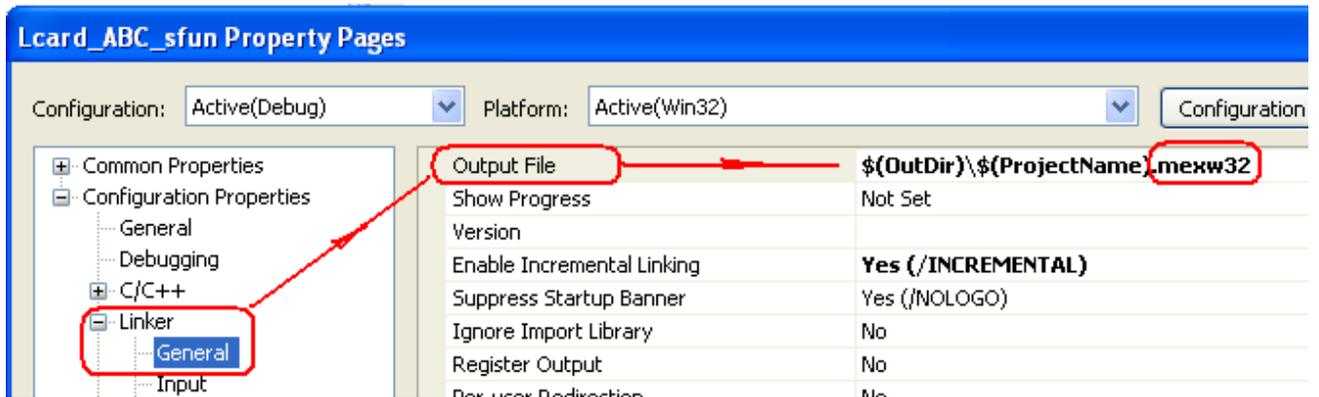
5. Подключите к проекту директорию файла **mexversion.rc** МаТЛАБ и **Simulink**



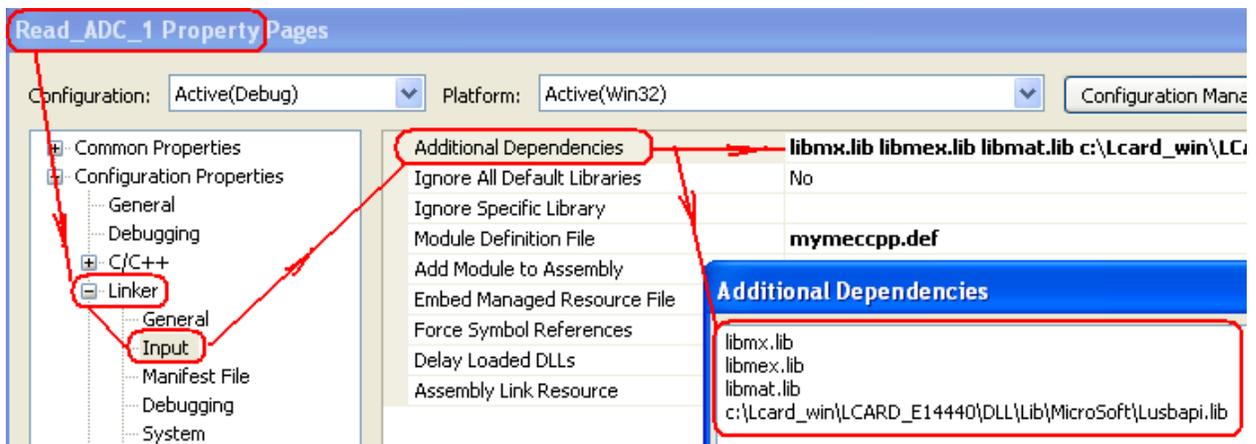
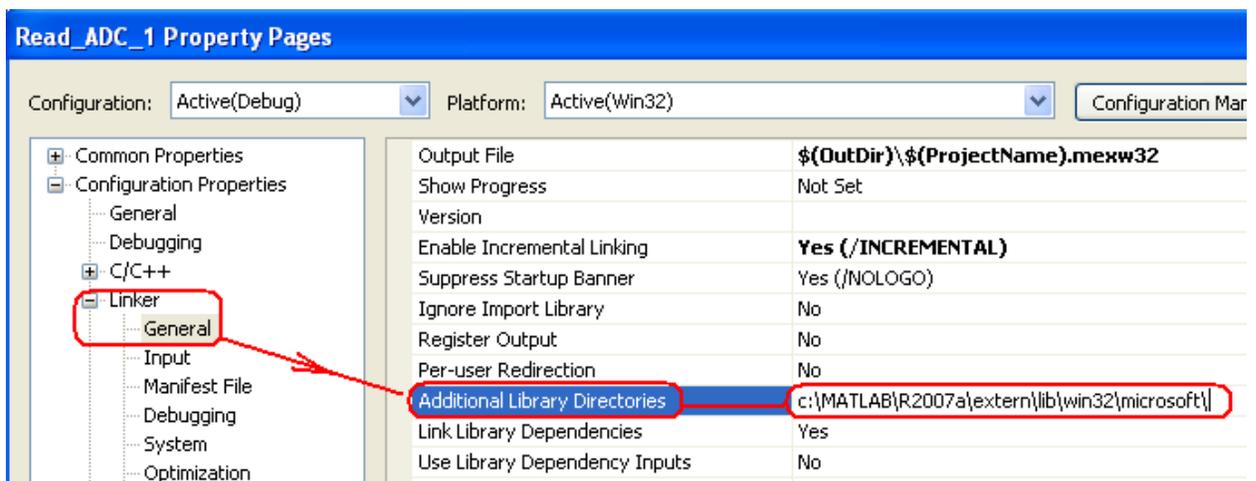
6. Добавьте к определениям препроцессора **MATLAB_MEX_FILE**



7. Измените расширение выходного файла компилятора с `dll` на `mexw32`.



8. Подключите библиотеки МатЛАБ `matlabroot\extern\lib\win32\microsoft\ libmx.lib, libmex.lib, and libmat.lib` и библиотеку модуля E14-440 `Lusbapi`



9. Откомпилируйте проект. В результате должен появиться файл **Read_ADC_1.mexw32**.

НАСТРОЙКА SIMULINK МОДЕЛИ СИСТЕМЫ ТЕРМОСТАТИРОВАНИЯ НА РАБОТУ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

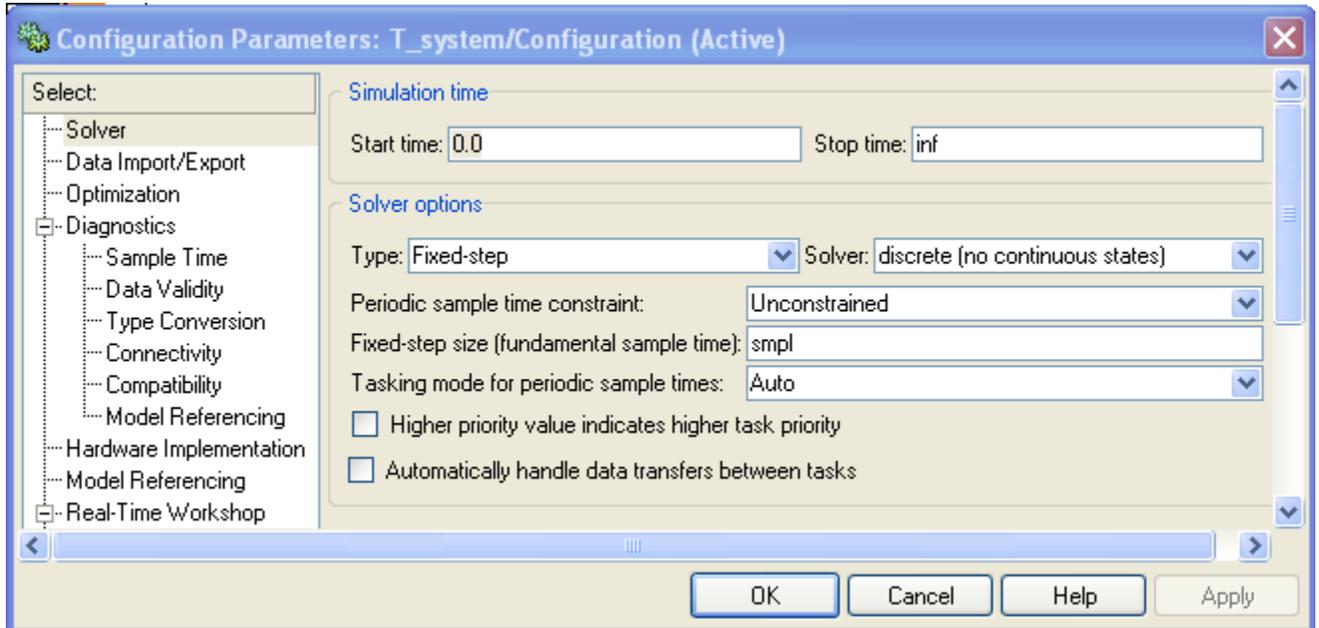


Рис. 8. Конфигурация модели. Шаг моделирования **smpl** установлен 0.05 сек, что с точностью выше 3-х % соответствует реальному времени операционной системы на тестируемом компьютере. На другом компьютере шаг моделирования, соответствующий реальному времени, составлял 0.25 сек. Время чтения АЦП модуля E14-440, в основном, определяется временем выполнения **ADC_SAMPLE** - функции однократного чтения библиотеки **Lusbari**.

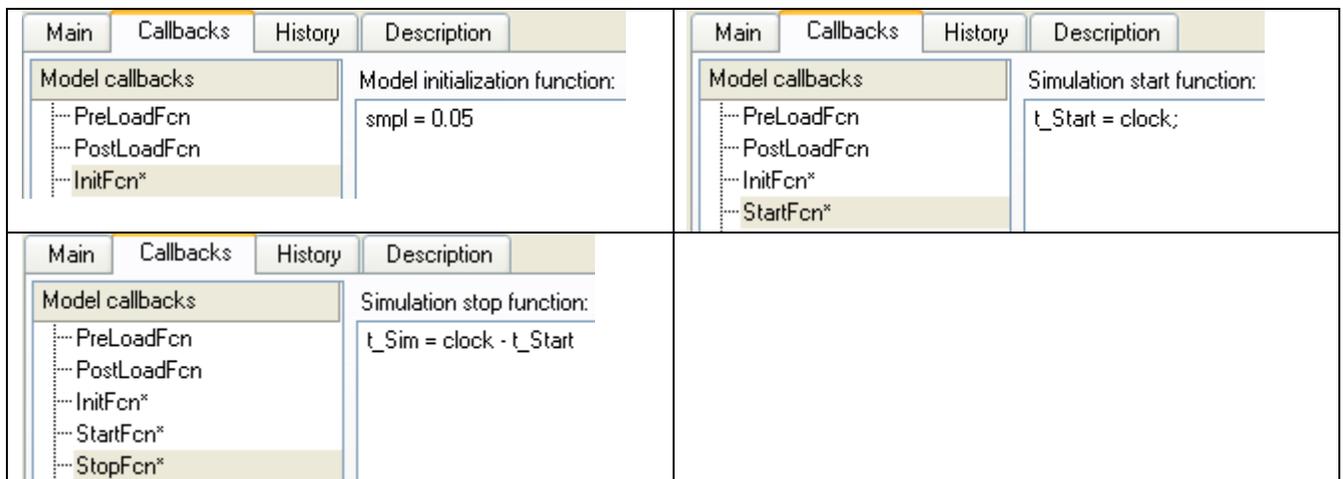


Рис. 9. Настройки модели Model Explorer. После остановки модели в окно команд выводится реальное время работы модели, которое следует сравнить с установленным временем моделирования.

Внимание! Соответствие времени моделирования реальному времени необходимо обеспечивать заданием величины шага моделирования. Шаг моделирования необходимо подобрать так, чтобы свести к минимуму разницу между временем моделирования (**stop time**) и реальным временем выполнения модели, которое вычисляется функцией $t_{Sim} = clock - t_{Start}$ сразу по завершению моделирования.

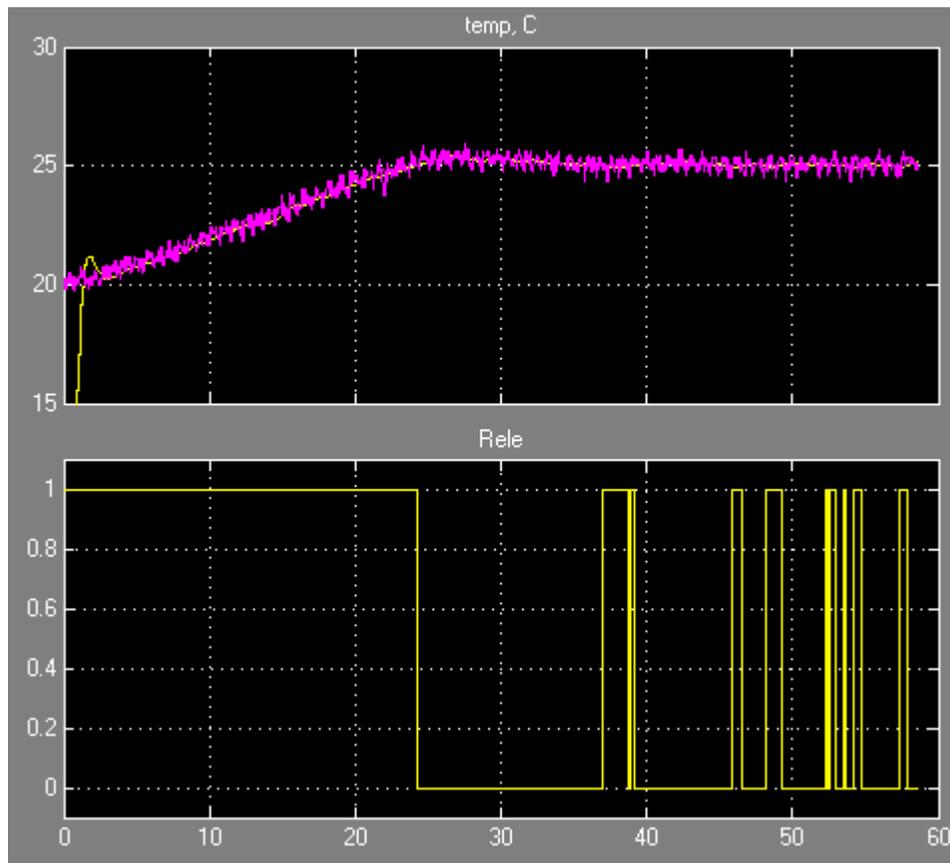


Рис. 10. Временная зависимость температуры (верхний рисунок) от состояния лампы накаливания (вкл/выкл – нижний график) в контуре системы термостатирования. Малиновый график показывает сигнал на входе фильтра, желтый график верхнего рисунка – сигнал на выходе фильтра)

ВЫЗОВ S-ФУНКЦИИ В SIMULINK

S-функция должна находиться в рабочем каталоге модели.

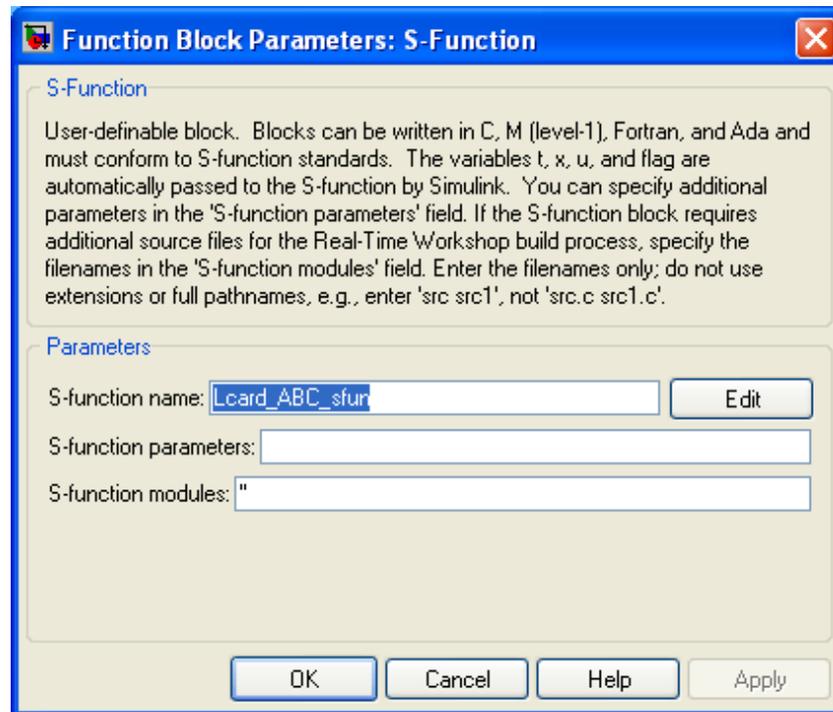


Рис. 11. Страница блока модели S-function.

ВНИМАНИЕ: Для успешного вызова S-функции необходимо, чтобы библиотека Lusbapi.dll находилась в рабочем каталоге (предпочтительно) или в папке динамических библиотек операционной системы (не желательно, но можно)

После редактирования S-функции ее необходимо откомпилировать. Для подключения новой откомпилированной S-функции к модели Simulink необходимо

1. Закрыть МатЛАБ
2. Скопировать новую функцию в рабочий каталог модели.
3. Загрузить МатЛАБ.
4. Загрузить модель, содержащую S-функцию
5. Открыть блок функции.
6. Удалить имя из поля “S-function name” и нажать кнопку “Apply”
7. Ввести имя функции в поле “S-function name” и нажать кнопку “Apply”
8. Подключение отредактированной S-функции к модели Simulink завершено.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Задание 1. Построение системы термостатирования.

1. Соберите систему термостатирования (см. Рис. 1 и Рис. 3)
2. Настройте систему на работу в реальном времени (см. Рис. 18 и Рис. 9)
3. Запустите систему термостатирования.
4. Настройте фильтр (см. Рис. 1 и Рис. 10)
5. Оптимизируйте параметры регулятора (см. Рис. 1)
6. Зарегистрируйте параметры, характеризующие работу системы термостатирования (пример см. на Рис. 1): измерьте время переходного процесса, ошибку системы, период и амплитуду автоколебаний.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какова точность отсчета реального времени в построенной системы термостатирования?
2. Что определяет частоту дискретизации системы?
3. Перечислите пути увеличения точности системы термостатирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Программное обеспечение Lcomp Руководство программиста. Комплект ПО для разработки приложений (SDK)
2. Устройства для мобильных систем, E14-440, Внешний модуль АЦП/ЦАП/ТТЛ на шину USB 1.1, Руководство пользователя, Москва. Май 2008 г.
3. Dr. Bob Davidov. Компьютерные технологии управления в технических системах <http://portalnp.ru/author/bobdavidov>.