

УДК 681.5.017

А.А. Шилин, В.Г. Букреев, Е.И. Гладышева

## Моделирование нелинейных систем на FBD-блоках с ограниченным базисом

Предложены процедура моделирования и организация алгоритмов управления в реальном времени сложными объектами в программной среде Functional Block Diagram (FBD). Рассмотрен иллюстративный пример решения задачи управления теплообменной системой, представленной нелинейной моделью в пространстве состояний. Приведены алгоритм преобразования Simulink-модели теплообменной системы в структуру FBD и сравнительная оценка результатов моделирования.

**Ключевые слова:** моделирование нелинейных систем, функциональные блоки, реализация на ПЛК.

Значительная часть исследований в области теории автоматического управления содержит прикладную часть работы в виде результатов экспериментов и моделирования, представленных в виде программ на языке MatLab или структур, организованных в среде Simulink. Это определяется тем, что основная работа, связанная с анализом свойств замкнутых систем управления, достаточно эффективно выполняется на персональном компьютере (ПК). Однако среда программирования контроллеров не совместима с программным кодом, полученным в среде MatLab, и требует решения проблемы реализации этого алгоритма непосредственно в контроллере. Цель работы: показать возможность моделирования нелинейных объектов в реальном времени. Назначение статьи: предложить технологию имитационного моделирования и тестирования систем управления в среде FBD для программирования контроллера.

**Краткий обзор методов реализации алгоритмов в контроллерах.** Решение задач синтеза и реализация систем управления требуют выполнения предварительного моделирования с последующей коррекцией алгоритмов на технологическом объекте для исключения ошибок, которые могут стать причиной повреждения дорогостоящего оборудования. Мощный математический пакет программного обеспечения Simulink, который входит в состав MatLab, интуитивно понятен для специалистов, работающих непосредственно с оборудованием. Так, в статье [1] хорошо представлен подход к реализации научных разработок до стадии виртуального лабораторного стенда на базе пакет Simulink в рамках возможностей ПК.

Известны также и инженерные, удобные для практического использования методы настройки и подходы к изучению работы регулятора, где проверка результатов моделирования поддерживается программной средой Simulink [2]. Оптимальные настройки регулятора можно получить, используя известные, реализованные в MatLab такие методы, как: методы Циглера–Николса, Шеделя и др., входящие в пакет NCD [3]. Однако размещение в контроллере системы управления исходного кода на языке MatLab не представляется возможным, алгоритм работы регулятора необходимо реализовать на языке программно-логического контроллера (ПЛК). Следует отметить, что таких языков достаточно много: низкоуровневые языки Ассемблер, Си, Tehno-IL; языки высокого уровня Си++, Питон и др. Кроме того, некоторые ПЛК позволяют выполнять скрипты, построенные на основе диаграммы из функциональных блоков в среде визуального конструирования: Functional Block Diagram (FBD). Набор блоков FBD призван соответствовать международному стандарту МЭК 61131, но, как правило, во многих ПЛК реализован лишь их минимальный набор. Методология построения систем управления на FBD-логике аналогична построению структур в среде Simulink, отличие заключается в достаточно больших возможностях Simulink, но которые невозможно полностью реализовать на ограниченной базе блоков среды FBD.

Предполагается, что специалисты в области синтеза систем управления в большей мере являются математиками, нежели программистами, и многие из них испытывают трудности в реализации своих научных разработок на реальных объектах управления. Тем не менее созданную модель Simulink можно использовать для автоматического создания структурированного текста, соответствующего международному стандарту МЭК 61131 и предназначенного для программирования ПЛК

при развертывании. Для этого существует программный пакет расширения Simulink PLC Coder™ [4], который формирует программу, код или скрипт, соответствующий разработанной математической модели в системе Simulink. Далее, если возможности FBD позволяют, код легко импортируется в среду моделирования, используемую для работы с целевым ПЛК. Это действительно удобный инструмент для решения прикладных научно-технических задач, который позволяет, не вдаваясь в подробности программирования контроллера, быстро реализовать исследуемую систему на действующем объекте управления. Однако существуют некоторые препятствия: пакеты MatLab и Simulink PLC Coder™ имеют значительную стоимость, также и список контроллеров, поддерживаемых пакетом Simulink PLC Coder™, небольшой и состоит обычно из дорогих ПЛК, чаще всего избыточных по вычислительным ресурсам при построении многоуровневых систем управления. Следует отметить, что кроме Simulink PLC Coder™ имеются другие пакеты, такие как «SoftLogic система МастерPLC», поддерживающие в меру эффективные и экономичные ПЛК, но они не имеют сопряжения с программным обеспечением MatLab.

**Постановка задачи и процедура создания имитационной модели в среде FBD ПЛК.** Для нелинейных систем с элементами запаздывания требуется апробировать технологию имитационного моделирования и тестирования в среде FBD ПЛК управляющего регулятора. Предполагается, что количество FBD-блоков ограничено вычислительными возможностями контроллера.

Рассмотрим нелинейный объект управления – теплообменную систему, состоящую из теплообменного аппарата, во внутреннем контуре которого используется электромеханический клапан, обеспечивающий стабилизацию температуры теплоносителя в контуре на основании измерительной информации датчика. Внешний контур теплообменного аппарата образован распределенной трубопроводной сетью, определяющей запаздывающую реакцию теплоносителя в этом контуре на протекающий теплоноситель во внутреннем контуре [5].

Рассматривая задачу стабилизации температуры теплоносителя во внутреннем контуре теплообменного аппарата, динамику процессов можно представить в пространстве таких переменных состояния, как нормированное значение положения штока  $h$  клапана относительно максимального значения, температуры  $T_{\text{пд}}^{\circ}$  теплоносителя во внутреннем контуре, температуры  $T_{\text{из}}^{\circ}$  корпуса изолятора датчика и температуры  $T_{\text{д}}^{\circ}$  термодатчика. На основании практического опыта и априорных знаний о характере протекающих процессов математическая модель нелинейной теплообменной системы представляется в виде следующей системы дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dh}{dt} = \frac{u(t)}{T_{\text{пр}}}, \\ \frac{dT_{\text{пд}}^{\circ}}{dt} = \frac{\left( (T_1^{\circ} - T_{\text{обр}}^{\circ}) \cdot (1 - e^{-k_h \cdot h}) \cdot k_{\text{max}} \right) + T_{\text{обр}}^{\circ} - T_{\text{пд}}^{\circ}}{T_{\text{см}}}, \\ \frac{dT_{\text{из}}^{\circ}}{dt} = \frac{(T_{\text{пд}}^{\circ} - T_{\text{из}}^{\circ})}{T_{\text{из}}}, \\ \frac{dT_{\text{д}}^{\circ}}{dt} = \frac{(T_{\text{из}}^{\circ} - T_{\text{д}}^{\circ})}{T_{\text{д}}}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $u(t)$  – релейный сигнал управления, принимающий дискретные значения  $[-1, 0, 1]$ ;  $T_{\text{пр}}, T_{\text{см}}, T_{\text{из}}, T_{\text{д}}$  – соответственно постоянные времени электропривода клапана, процесса смешения теплоносителей, изолятора датчика и датчика;  $T_1^{\circ}$  и  $T_{\text{обр}}^{\circ}$  – соответственно температура теплоносителя от источника и температура обратного теплоносителя;  $k_h$  и  $k_{\text{max}}$  – параметры, характеризующие нелинейность процесса смешения теплоносителя во внутреннем контуре теплообменного аппарата, определяются для конкретных режимов работы и, в частности, могут быть приняты  $k_h = 0,9$  и  $k_{\text{max}} = 1,1$ .

С учетом фиксированных значений  $k_h$  и  $k_{max}$  линеаризованная математическая модель в точках равновесного состояния нелинейной теплообменной системы может быть представлена в виде передаточной функции

$$W_{ob}(s) = \frac{k_0(h_0, T_1^\circ, T_{обр}^\circ)}{T_{пр} \cdot s \cdot (1 + T_{см} \cdot s) \cdot (1 + T_d \cdot s) \cdot (1 + T_{из} \cdot s)},$$

$$k_0(h_0, T_1^\circ, T_{обр}^\circ) = (T_1^\circ - T_{обр}^\circ) \cdot \left(1 - e^{k_h \cdot h_0}\right) \cdot k_{max} / h_0, \quad (2)$$

где  $k_0$  – коэффициент передачи разомкнутой системы в точке равновесия, соответствующей положению клапана  $h=h_0$ .

**Задача синтеза ПИ-регулятора.** Для теплообменной системы, представленной в виде передаточной функции (2), достаточно использовать корректирующее звено, реализующее ПИ-закон регулирования

$$W_{pi}(s) = \frac{k_1 \cdot (1 + T_{рег} \cdot s)}{(1 + k_2 \cdot T_{рег} \cdot s)}, \quad (3)$$

где  $k_1$  – коэффициент усиления регулятора. Параметр регулирования  $k_2$  положительный, меньше единицы, как правило, выбирается в пределах  $k_2 = (0,1 \dots 0,3)$  и имеет содержательный смысл относительного коэффициента усреднения при дифференцировании. Выбор значения этого коэффициента определяется качеством измерения регулируемой величины. Так, при отсутствии аддитивных шумов и эффекта квантования усреднять оценку значения производной не следует. В этом случае  $k_2 = 0$  и выражение (3) будет соответствовать ПД-регулятору. Параметр  $T_{рег}$  – постоянная времени регулятора. Если рассмотреть последовательное соединение (2) и (3), то пропорциональный  $k_p$  и интегрирующий  $k_i$  коэффициенты ПИ-регулятора определяются следующим равенством:

$$k_p = k_1 \cdot T_{рег} / T_{пр}; k_i = k_1 / T_{пр}. \quad (4)$$

Задача синтеза данного типа регулятора предполагает определение параметров  $k_1, T_{рег}, k_2$  регулирования с учетом условий устойчивости замкнутой системы с обратной связью при возможных изменениях значений параметра  $k_0$ . Предполагая, что все параметры, кроме  $k_0$ , стационарные, можно отметить, что минимальный запас устойчивости и условия оптимального управления следует искать при максимальном значении коэффициента  $k_0 = k_{0max}$ . Очевидно, что уменьшение коэффициента  $k_0$  приведет к затягиванию переходного процесса и увеличению запаса устойчивости, что является допустимым. Существует достаточно большое количество методов выбора оптимальных настроек ПИ-регулятора, использующих различные критерии оптимальности. В нашем случае, не отдавая предпочтений конкретным методам синтеза оптимальных регуляторов, для определения параметров закона регулирования будем использовать численный подход. Наиболее распространенным критерием оптимальности является квадратичный функционал качества

$$J(k_1, T_{рег}) = \int_{t=t_0}^{\infty} \Delta x(t)^2 \cdot (t - t_0) \cdot dt, \quad (5)$$

где  $\Delta x(t)$  – значение рассогласования (ошибка регулирования), определяется равенством  $\Delta x(t) = T_{задан}^\circ(t) - T_d^\circ(t)$ . При вычислении функционала (5) рассматривается замкнутая система с объектом (2) и регулятором (3), на сигнал управления наложено ограничение  $u(t) \leq 1$  с максимально возможным значением рассогласования  $\Delta x_{max}(t) = 10^\circ\text{C}$ . Результатом решения вариационной задачи относительно коэффициентов ПИ-регулятора является поверхность (рис. 1), на которой однозначно определяется минимум, соответствующий оптимальным параметрам  $k_1, T_{рег}$ .

**Имитационное моделирование теплообменной системы.** Работоспособность теплообменной системы и эффективность регулятора можно проверить на имитационной SimuLink модели или на ее аналоге в программной среде Xcos пакета SciLab [6]. Структура системы управления в среде Xcos пакета SciLab представлена на рис. 2.

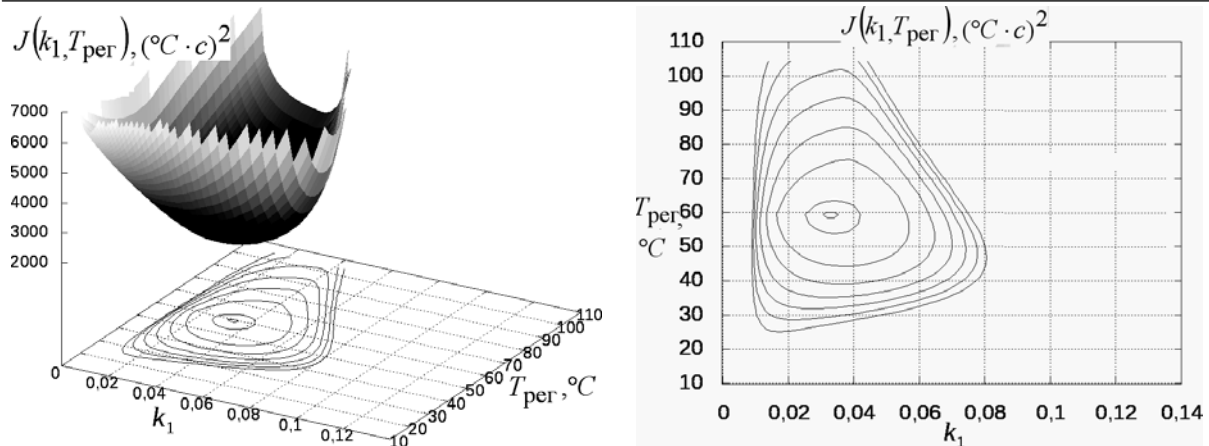


Рис. 1. Поверхность значений функционала в пространстве параметров ПИ-регулятора

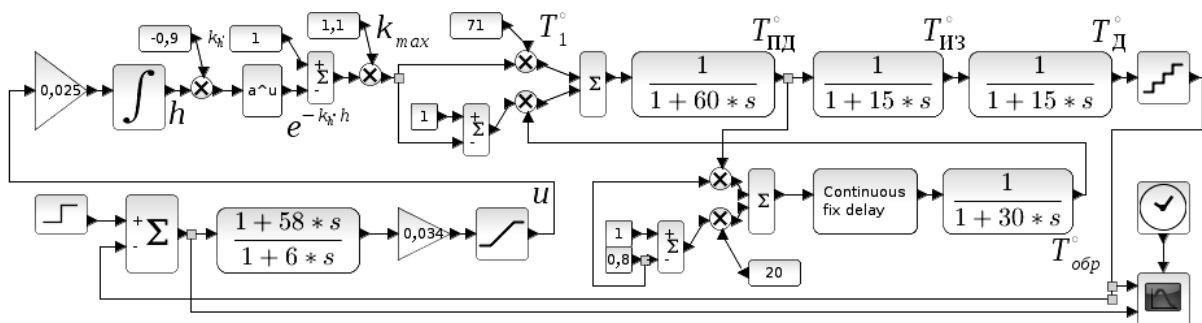


Рис. 2. Структура системы управления в среде Xcos (SimuLink)

В приведенной структурной схеме учитывается такое свойство теплообменной системы, как зависимость температуры теплоносителя во внешнем контуре от температуры теплоносителя внутреннего контура. Для реализации модели (1) в среде Xcos элемент задержки аппроксимируется цепочкой из последовательно включенных апериодических звеньев первого порядка, и на этапе моделирования можно выполнить необходимые численные эксперименты, подтверждающие работоспособность и эффективность алгоритмов управления теплообменной системой в реальном времени. Существенным затруднением при создании адекватной имитационной модели нелинейной системы в среде FBD используемого ПЛК [7] является ограниченность набора FBD-блоков, что значительно усложняет решение задач предварительного тестирования и перенастройки параметров регулятора. Одним из вариантов решения этой проблемы является предварительное преобразование априорной нелинейной модели системы в линейную модель путем корректной замены координат.

В нашем случае с целью исключения экспоненциальной нелинейности в первом уравнении системы (1) используем замену переменной  $K_{CM}(t) = (1 - e^{-k_h \cdot h}) \cdot k_{max}$ . В результате исходная математическая модель теплообменной системы записывается в следующем виде:

$$\begin{cases} \frac{dK_{CM}(t)}{dt} = (k_{max} - K_{CM}(t)) \cdot \frac{k_h}{T_{пр}} \cdot u(t), \\ \frac{dT_{пд}^{\circ}(t)}{dt} = \frac{\left( (T_1^{\circ} - T_{обр}^{\circ}(t)) \cdot K_{CM}(t) \right) + T_{обр}^{\circ} - T_{пд}^{\circ}(t)}{T_{CM}}, \\ \frac{dT_{из}^{\circ}(t)}{dt} = \frac{\left( T_{пд}^{\circ}(t) - T_{из}^{\circ}(t) \right)}{T_{из}}, \\ \frac{dT_{д}^{\circ}(t)}{dt} = \frac{\left( T_{из}^{\circ}(t) - T_{д}^{\circ}(t) \right)}{T_{д}}. \end{cases} \quad (6)$$

Используя данную математическую модель теплообменной системы и алгоритм работы регулятора, можно создать имитационную модель непосредственно на FBD ПЛК (рис. 3).

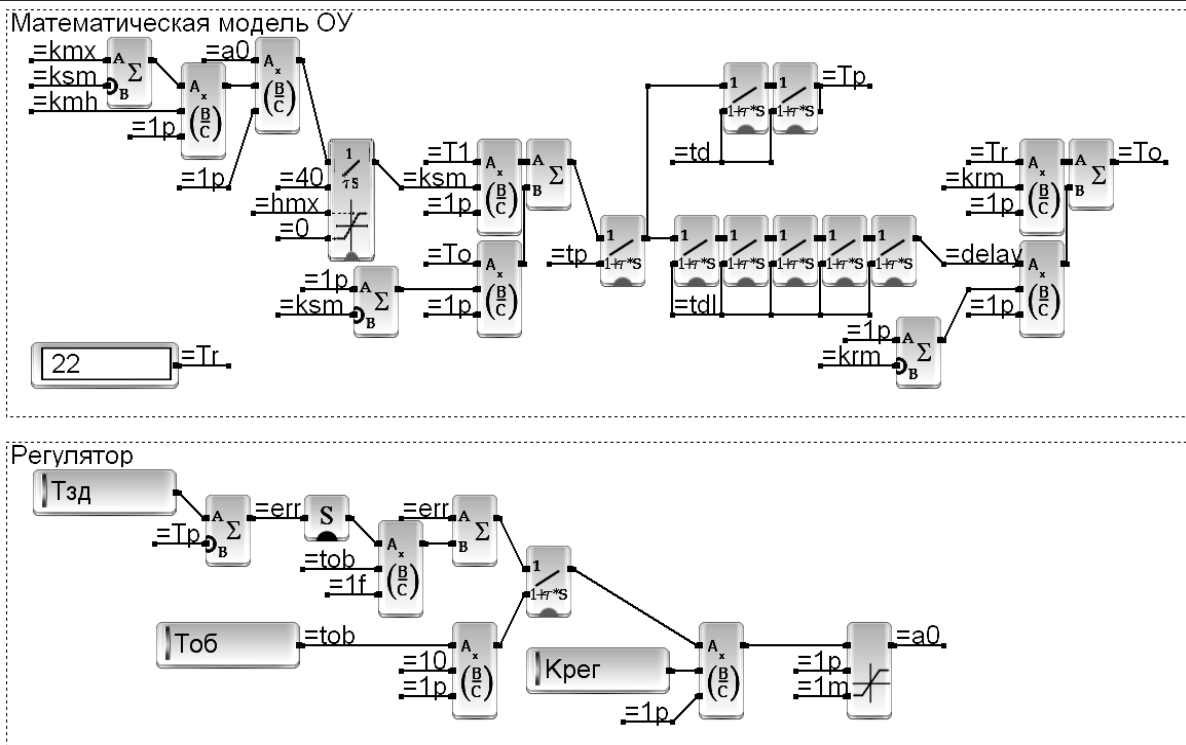


Рис. 3. Реализация теплообменной системы и ПИ-регулятора на FBD блоках ПЛК

На рисунке приняты обозначения регистров соответствуют переменным и параметрам для (3) и (6), диктуемые компилятором FBD и скрипта программы производителя:  $=T_1 \Rightarrow T_1^\circ$ ;  $=Tp \Rightarrow T_{пд}^\circ$ ;  $=ksm \Rightarrow K_{см}$ . Подобным образом в структуру введены константы  $=Tr \Rightarrow T_{ком}^\circ = 20^\circ\text{C}$ ;  $=kmh \Rightarrow k_h = 0,9$ ;  $=kmx \Rightarrow k_{max} = 1,1$ ;  $=p \Rightarrow 100$ .

**Некоторые результаты моделирования.** Результаты имитационного моделирования и тестирования экспериментальной системы, представленные в виде переходных процессов, соответствуют положению клапана в окрестности открытого (рис. 4) и закрытого (рис. 5) состояния и отражают работоспособность имитационной модели теплообменной системы и ПИ-регулятора.

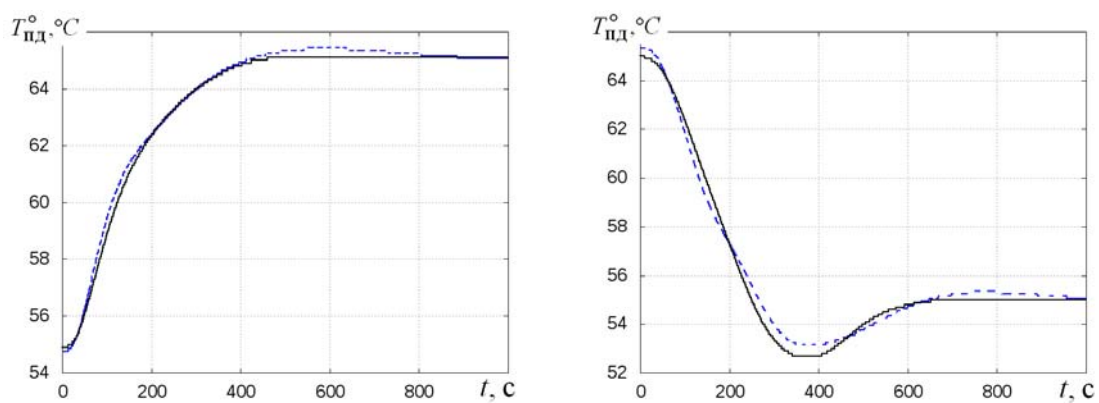


Рис. 4. Переходные процессы при открытом положении клапана

Различие переходных процессов обусловлено нелинейностью процесса смешения ОУ, представленного как в (1) так и в (6), причем незначительное отличие переходных процессов разными методами моделирования свидетельствует об адекватности обеих моделей ОУ. Отличие переходных процессов в одинаковых условиях объясняется тем, что в Simulink-модели (пунктирная линия) транспортное запаздывание реализовано в виде буфера оперативной памяти, а в FBD-модели (сплошная линия) – аппроксимацией инерционными звеньями.

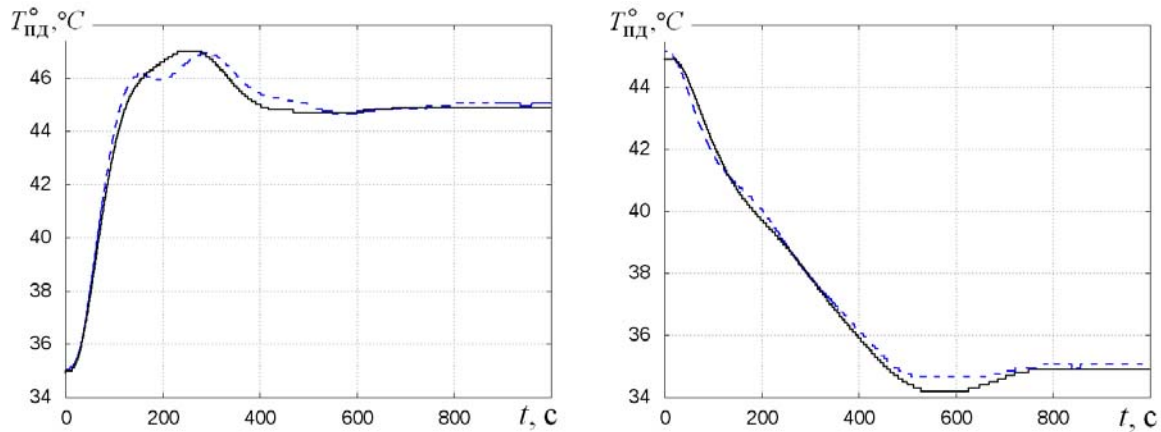


Рис. 5. Переходные процессы при закрытом положении клапана

### Выводы

1. Опыт имитационного моделирования в среде FBD ПЛК показывает, что функциональные возможности FBD незначительно уступают возможностям пакета Simulink.
2. Скорость моделирования на FBD-блоках значительно выше, примерно в 8–10 раз, по сравнению со скоростью вычисления на Simulink и Xcos, потому что FBD-блоках реализован быстродействующий и оптимизированный под микроконтроллеры код подпрограмм.
3. Отсутствует проблема реализации алгоритма на действующем ПЛК, так как в результате моделирования в среде FBD полученный код можно в режиме реального времени импортировать из среды моделирования непосредственно в ПЛК для выполнения эксперимента на действующем объекте управления.
4. С точки зрения обучения специалистов настройке параметров регулирования представляет интерес тестирование работы регулятора совместно с моделью объекта управления в реальном времени непосредственно на ПЛК.

### Литература

1. Герман-Галкин С.Г. Моделирование устройств силовой электроники. Создание виртуальных лабораторий в среде Matlab-Simulink // Силовая электроника. – 2008. – №2. – С. 144–150.
2. Настройка ПИД-регулятора. Aauto-works [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://autoworks.com.ua/teoreticheskie-svedeniya/nastrojka-pid-regulyatora>, свободный (дата обращения: 06.02.2013).
3. Сидорова А.А. Исследование настройки ПИД-регулятора в Simulink-Matlab / А.А. Сидорова, А.М. Мальшенко // Технологии Microsoft в теории и практике программирования: тр. 7-й Всерос. науч.-практ. конф. – Томск: ТПУ, 2011. – С. 13–15.
4. Кодати П. Разработка и реализация на базе ПЛК комплексных стратегий управления/ П. Кодати, Т. Эрркинен, А. Туревский // Электронные компоненты: сетевой журн. 2012. – №3 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://sl-matlab.ru/news/PLC%20Modeling%20Simulink.pdf> свободный (дата обращения: 06.02.2013).
5. Шилин А.А. Нелинейная математическая модель теплотребления с учетом характеристик элементов теплового узла / А.А. Шилин, В.Г. Букреев // Научный вестник НГТУ. – 2012, №2(47). – С.107–114
6. SciLab. Open source software for numerical computation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.scilab.org/download/5.4.0> свободный (дата обращения: 06.02.13).
7. Автоматизированный комплекс исследования автоматических регуляторов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://npowest.ru/7-programmnoe-obespechenie.html> свободный (дата обращения: 06.02.13).

**Шилин Александр Анатольевич**

Канд. техн. наук, доцент каф. электропривода и электрооборудования НИ ТПУ

Тел.: 8 (382-2) 56-31-47

Эл. почта: shilin@tpu.ru

**Букреев Виктор Григорьевич**

Д-р техн. наук, профессор каф. электропривода и электрооборудования НИТПУ

Тел.: 8 (382-2) 56-30-45

Эл. почта: bukreev@tpu.ru

**Гладышева Екатерина Игоревна**

Студентка каф. промышленной электроники ТУСУРа

Тел.: 8-952-886-60-39

Эл. почта: yegl@yandex.ru

Shilin A.A., Bukreev V.G., Gladysheva E.I.

**Simulation of nonlinear systems in FBD blocks with limited basis**

The technology of modeling and organization of the control algorithms in real-time complex object in the software environment Functional Block Diagram (FBD) are offered. An illustrative example of the solution of the heat-exchange control system, represented by nonlinear state-space model is considered. The algorithm that transforms Simulink-model heat exchanger system in the structure of the FBD and comparative evaluation of the simulation results are presented.

**Keywords:** modeling of nonlinear systems, function blocks, implementation of the PLC.