

УДК УДК 681.515681.515
DOI: 10.18799/29495407/2023/4/39
Шифр специальности ВАК: 05.13.01

Программная реализации псевдолинейного корректирующего устройства с отдельными каналами для амплитуды и фазы в промышленном управлении

Ч. Ли, М.В. Скороспешкин✉

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

✉ smax@tpu.ru

Аннотация. Рассматривается подход к повышению качества управления нестационарным объектом путем включения в систему автоматического регулирования псевдолинейного корректирующего устройства с отдельными каналами для амплитуды и фазы. Корректирующее устройство позволяет повышать запас устойчивости по амплитуде и по фазе независимо друг от друга и независимо от амплитуды входного сигнала. Корректирующему устройству можно придать свойство адаптивности – меняя параметры настройки корректирующего устройства, можно повысить качество управления нестационарным объектом в режиме реального времени. Приведена модель системы автоматического регулирования объектом второго порядка с ПИД-регулятором и псевдолинейным корректирующим устройством. Показан пример программной реализации псевдолинейного корректирующего устройства с отдельными каналами для амплитуды и фазы в виде функционального блока на языке FBD на платформе CoDeSys 2.3.

Ключевые слова: псевдолинейное корректирующее устройство с отдельными каналами для амплитуды и фазы, нестационарный объект управления, качество регулирования

Для цитирования: Ли Ч., Скороспешкин М.В. Программная реализации псевдолинейного корректирующего устройства с отдельными каналами для амплитуды и фазы в промышленном управлении // Известия Томского политехнического университета. Промышленная кибернетика. – 2023. – Т. 1. – № 4. – С. 21–27. DOI: 10.18799/29495407/2023/4/39

UDC 681.511.4
DOI: 10.18799/29495407/2023/4/39

Software implementation of a pseudo-linear correction device with separate channels for amplitude and phase in industrial control

Zh. Li, M.V. Skorospeshkin✉

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

✉ smax@tpu.ru

Abstract. The paper proposes an approach to improve the quality of control for a nonstationary system by incorporating an automatic control system with a pseudolinear corrective device with separate channels for amplitude and phase control. The corrective device enables independent adjustment of stability margins for both amplitude and phase, regardless of the input signal amplitude. The corrective device can also be adaptive, allowing real-time adjustment of its parameters to enhance control quality for nonstationary systems. The paper introduces a model of the automatic control system, featuring a second-order system with a PID controller and a pseudolinear corrective device. An example of a software implementation of the pseudolinear corrective device with separate amplitude and phase channels is provided using the Function Block Diagram (FBD) language on the CoDeSys 2.3 platform.

Keywords: pseudolinear correction device with separate channels for amplitude and phase, non-stationary control object, control quality

For citation: Li Zh., Skorospeshkin M.V. Software implementation of a pseudo-linear correction device with separate channels for amplitude and phase in industrial control. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Industrial Cybernetics*, 2023, vol. 1, no. 4, pp. 21–27. DOI: 10.18799/29495407/2023/4/39

Введение

В настоящее время в большинстве систем автоматического управления используют ПИД-регуляторы. Однако существуют системы, где параметры объекта управления меняются со временем, и для управления такими системами можно использовать ПИД-регуляторы, которые могут подстраивать свои параметры в процессе работы. Использование такого подхода требует значительного времени на подстройку, что может затруднить реализацию таких систем.

Другой подход заключается в использовании корректирующих устройств (КУ), которые способствуют улучшению качества управления нестационарными объектами и обеспечению необходимой степени устойчивости в соответствии с требованиями системы [1, 2]. Среди них псевдолинейное корректирующее устройство, которое способно адаптивно увеличивать амплитудный и фазовый запас системы [3]. В данной работе рассматривается программная реализация псевдолинейного корректирующего устройства на языке FBD на современной широко распространенной платформе CoDeSys 2.3.

Теория псевдолинейного корректирующего устройства

Псевдолинейное корректирующее устройство с раздельными каналами для амплитуды и фазы позволяет получить различные амплитудно-фазовые соотношения, т. е. относительно независимо формировать амплитудную и фазовую характеристики нелинейного фильтра, и эти характеристики не зависят от амплитуды входного сигнала [4]. Структурная схема данного корректирующего устройства показана на рис. 1. Амплитудный канал состоит из

линейного элемента с передаточной функцией (1) и блока выделения модуля. Фильтр $W_A(s)$ создает амплитудное ослабление.

$$W_A(s) = \frac{1}{T_1 s + 1}. \quad (1)$$

Фазовый канал состоит из линейного элемента с передаточной функцией и блока определения знака.

$$W_\Phi(s) = \frac{T s + 1}{T_2 s + 1}, \quad T > T_2. \quad (2)$$

Приняв $T_1=0,2$ с, $T_2=1$ с, $K=1$, построим АЧХ и ФЧХ данного корректирующего устройства в зависимости от T , которые показаны на рис. 2. Кривые 1–5 соответствуют значениям T равным 0,5; 1; 2; 3 и 5 с.

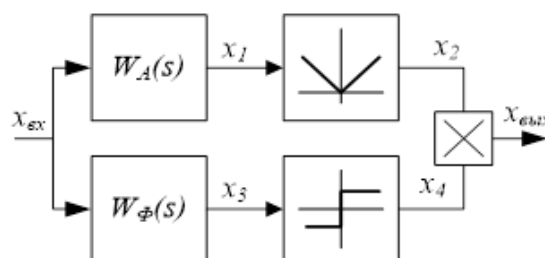


Рис. 1. Структурная схема корректирующего устройства с раздельными каналами для амплитуды и фазы

Fig. 1. Structural diagram of the corrective device with separate channels for amplitude and phase control

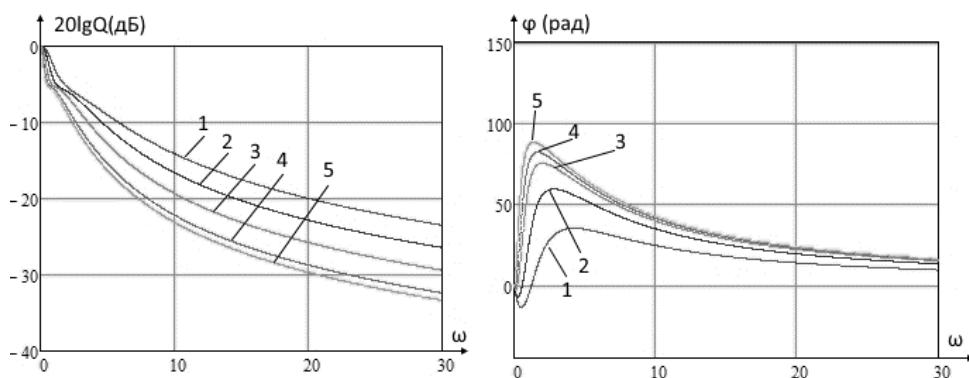


Рис. 2. АЧХ и ФЧХ двухканального корректирующего устройства при различных значениях T и фиксированных значениях $T_1=1$ с, $T_2=0,2$ с

Fig. 2. Frequency response characteristics (magnitude and phase) of the dual-channel corrective device for various values of T with fixed values of $T_1=1$ s, $T_2=0.2$ s

Из рис. 2 видно, что при изменении значения T фазовое опережение, вносимое корректирующим устройством, меняется, а амплитудное ослабление оказывается незначительным.

Псевдолинейное корректирующее устройство системы с переменными параметрами

Система с переменными параметрами – это система, параметры которой изменяются со временем или в зависимости от других переменных, что может влиять на процесс управления и требовать корректировки параметров регулятора.

Изменение параметров может быть вызвано различными факторами, такими как износ оборудования или изменение окружающей среды. Поэтому при разработке и настройке системы управления необходимо учитывать возможность изменения параметров объекта управления и использовать соответствующие методы адаптации и корректировки параметров управляющего устройства для обеспечения стабильной и точной работы системы управления в реальных условиях.

Для исследования был выбран объект управления второго порядка, передаточная функция которого имеет вид:

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{k}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}, \quad (3)$$

где k – статический коэффициент передачи ОУ; T_1 , T_2 – постоянные времени.

Значения параметров данного объекта управления: $k = 1$; $T_1 = 20$ с; $T_2 = 10$ с.

Передаточная функция (3) после подстановки числовых значений примет вид:

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{(20s + 1)(10s + 1)}. \quad (4)$$

Для настройки ПИД-регулятора в Simulink можно использовать функцию автоматической настройки. Автоматическая настройка ПИД-регулятора в Simulink позволяет быстро и эффективно настроить ПИД-регулятор для различных систем и задач управления. Первым этапом необходимо настроить параметры оптимизации и ограничения на значения коэффициентов ПИД-регулятора. Затем необходимо запустить процесс автоматической настройки, после которого Simulink выдаст оптимальные значения коэффициентов, которые можно использовать для настройки ПИД-регулятора в системе управления.

Модель системы управления объектом (4) в Simulink представлена на рис. 3.

Итоговые коэффициенты ПИД-регулятора для системы, представленной на рис. 3, приняты равными:

$$K_p = 3,4; K_i = 0,1; K_d = 3,8.$$



Рис. 3. Модель системы управления объектом (4) в Simulink

Fig. 3. Object control system model (4) in Simulink

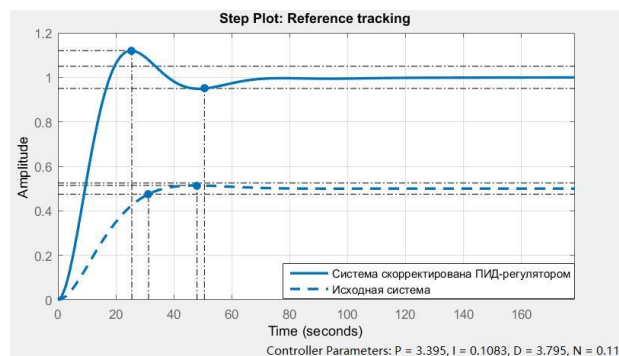


Рис. 4. Автоматическая настройка ПИД-регулятора в Simulink

Fig. 4. Automatic tuning of the PID controller in Simulink

Вид окна функции автоматической настройки показан на рис. 4.

Для наглядной демонстрации работоспособности системы автоматического регулирования с применением псевдолинейного корректирующего устройства в плане повышения качества системы регулирования нестационарным объектом были построены модели систем автоматического регулирования в Simulink, представленные на рис. 5.

На рис. 5 представлены модели систем регулирования для четырех систем: две системы с ПИД-регулятором, обозначенные на рисунке (1 и 2) и две системы с ПИД-регулятором и псевдолинейным корректирующим устройством, обозначенные соответственно (3 и 4).

Настройки коэффициентов ПИД-регулятора во всех системах одинаковые и приняты равными:

$$K_p = 3,4; K_i = 0,1; K_d = 3,8.$$

Настройки коэффициентов ПИД-регулятора остаются неизменными.

Согласно формуле (4), передаточная функция объекта управления имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{Y(s)}{X(s)} &= \frac{1}{(20s + 1)(10s + 1)} = \\ &= \frac{1}{200s^2 + 30s + 1} \Leftrightarrow \frac{k}{T_3 s^2 + T_4 s + 1}. \end{aligned} \quad (5)$$

Вид графика кривой переходного процесса для системы с ПИД-регулятором и исходным объектом управления (5) представлен на рис. 6 (кривая 1).

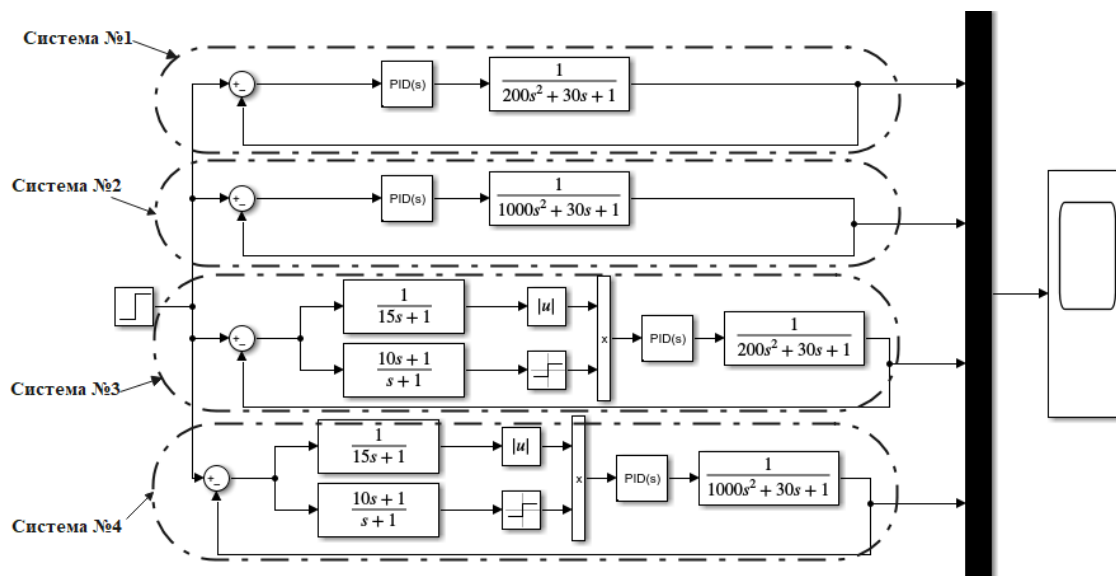


Рис. 5. Модели систем автоматического регулирования в среде MATLAB Simulink
Fig. 5. Models of automatic control systems in MATLAB Simulink environment

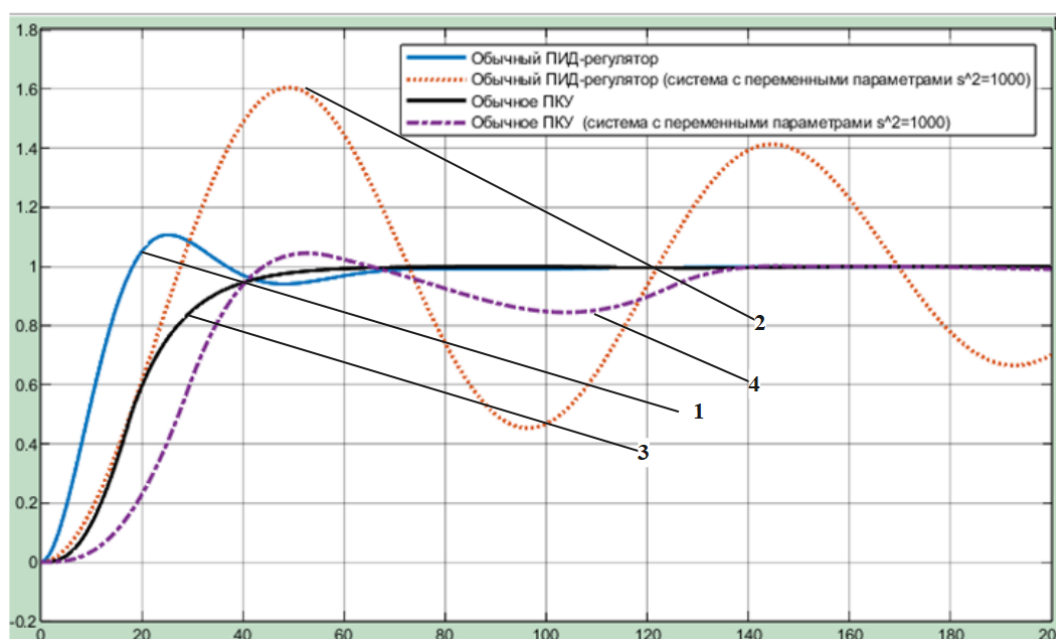


Рис. 6. Кривые переходных процессов
Fig. 6. Transient response curves

При увеличении значения постоянной времени объекта управления T_3 в системе с ПИД-регулятором (система 2, рис. 6) со значения $T_3=200$ с до $T_3=1000$ с уменьшается запас устойчивости системы, увеличивается амплитуда колебаний и время регулирования. Вид графика кривой переходного процесса представлен на рис. 6 (кривая 2). Из кривой наглядно видно, что качество регулирования значительно ухудшается.

При включении в систему 1 (рис. 5) псевдолинейного корректирующего устройства (рис. 5, система 3)

качество регулирования повышается и кривая переходного процесса становится аperiodической.

При увеличении значения постоянной времени объекта управления T_3 в системе с ПИД-регулятором и псевдолинейным корректирующим устройством (рис. 6, система 3) со значения $T_3=200$ с до $T_3=1000$ с запас устойчивости системы уменьшается (рис. 6, кривая 4), но не так значительно, как в системе только с ПИД-регулятором, без корректирующего устройства (рис. 6, кривая 2). Подстройкой параметров корректирующего устройства можно

добиться того, что вид кривой переходного процесса примет апериодический вид при значении $T_3=1000$ с.

Из рис. 5, 6 видно, что применение корректирующего устройства значительно повышает качество системы регулирования нестационарным объектом, а придание свойства адаптивности корректирующему устройству может позволить подстраивать параметры корректирующего устройства к изменившимся параметрам объекта управления в реальном времени, что обеспечит гарантированную устойчивость и высокое качество системы управления нестационарным объектом в реальном времени [5]. Также существует возможность реализации систем управления с применением современных подходов интеллектуального управления [6].

Программная реализация псевдолинейного корректирующего устройства с раздельными каналами для амплитуды и фазы

На сегодняшний день подавляющее большинство систем автоматического регулирования строится на базе промышленных микропроцессорных контроллеров. Псевдолинейное корректирующее устройство с раздельными каналами для амплитуды и фазы было реализовано в виде функционального блока на языке FBD на платформе CoDeSys 2.3.

Для реализации необходимо получить дискретные передаточные функции амплитудных и фазовых фильтров (1) и (2).

С помощью билинейного преобразования (6) можно получить дискретную передаточную функцию системы, которая описывает ее поведение в дискретном времени.

Преобразование имеет следующий вид:

$$s \Leftrightarrow \frac{2}{\Delta t} \cdot \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}, \quad (6)$$

где Δt – период дискретизации сигнала.

Фильтр псевдолинейного корректирующего устройства для фазового канала описывается передаточной функцией (2). Подставив данное преобразование в вышеуказанную передаточную функцию, можем собрать полином, содержащий отрицательные степени переменной:

$$W(z) = \frac{1+T \frac{2}{\Delta t} \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}}{1+\frac{2}{\Delta t} \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}} = \frac{Y(z)}{X(z)}. \quad (7)$$

После преобразований формула (7) принимает вид:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\Delta t + 2}{\Delta t} \right) Y(z) + \left(\frac{\Delta t - 2}{\Delta t} \right) Y(z) z^{-1} = \\ & = \left(\frac{\Delta t + T2}{\Delta t} \right) X(z) + \left(\frac{\Delta t - T2}{\Delta t} \right) X(z) z^{-1}. \end{aligned}$$

В преобразовании z^{-1} представляет задержку на один отсчет в дискретном временном домене ($t-\Delta t$). Если входной сигнал $X(z)$ задерживается на один отсчет, то его преобразование $X(z)$ будет умножено на z^{-1} .

В результате изложенного получена модель временной области данного выражения:

$$\begin{aligned} Y(t) = & \frac{(\Delta t + T2)}{(\Delta t + 2)} X(t) + \\ & + \frac{(\Delta t - T2)}{(\Delta t + 2)} X(t - \Delta t) - \frac{\Delta t - 2}{(\Delta t + 2)} Y(t - \Delta t). \end{aligned} \quad (8)$$

Уравнение (8) показывает текущее значение выходного сигнала Y , выраженное через текущие и прошлые значения входного сигнала X , $X1$ и прошлые значения выходного сигнала $Y1$.

$$Y = \frac{(\Delta t + T2)}{(\Delta t + 2)} X + \frac{(\Delta t - T2)}{(\Delta t + 2)} X1 - \frac{\Delta t - 2}{(\Delta t + 2)} Y1. \quad (9)$$

Фильтр псевдолинейного корректирующего устройства для амплитудного канала описывается передаточной функцией (1). С использованием того же метода можно получить следующее выражение:

$$Y = \left(\frac{2T - \Delta t}{2T + \Delta t} \right) Y1 + \frac{\Delta t}{2T + \Delta t} (X + X1). \quad (10)$$

В начальной итерации значения переменных $Y1$ и $X1$ равны нулю, а затем на каждой последующей итерации они принимают значения переменных Y и X соответственно.

Согласно формуле (9), реализация фильтра фазового канала псевдолинейного корректирующего устройства приведена на рис. 7.

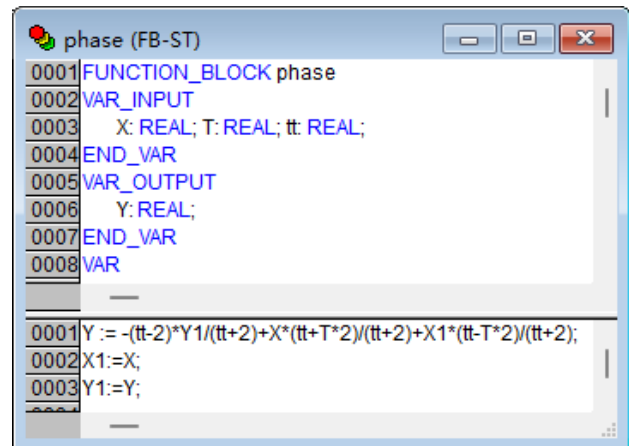


Рис. 7. Реализация фильтра псевдолинейного корректирующего устройства для фазы на языке ST

Fig. 7. Implementation of the pseudolinear corrective device phase filter in ST programming language

Данный код на языке ST представляет собой функциональный блок с именем phase, который имеет три входных параметра: X (Входной сигнал), T (Коэффициент постоянной времени ПКУ) и tt (период дискретизации сигнала). Также он имеет один выходной параметр Y (Выходной сигнал).

Согласно формуле (10), реализация фильтра амплитудного канала псевдолинейного корректирующего устройства приведена на рис. 8.

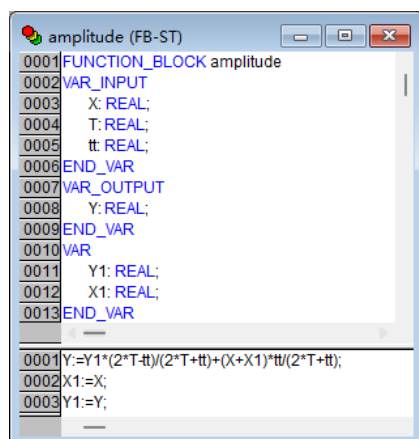


Рис. 8. Реализация фильтра псевдолинейного корректирующего устройства с амплитудным подавлением на языке ST

Fig. 8. Implementation of the pseudolinear corrective device with amplitude suppression filter in ST programming language

Данный код на языке ST представляет собой функциональный блок с именем amplitude, который имеет три входных параметра: X (Входной сигнал), T (Коэффициент постоянной времени ПКУ) и tt (период дискретизации сигнала). Также он имеет один выходной параметр Y (Выходной сигнал).

В соответствии со структурой, приведенной на рис. 1, можно построить функциональный блок псевдолинейного корректирующего устройства с отдельными каналами для амплитуды и фазы на языке FBD, показанной на рис. 9.

Апробация программной реализации псевдолинейного корректирующего устройства с отдельными каналами для амплитуды и фазы, проведенная на реальном объекте управления второго порядка, показала ее работоспособность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Скороспешкин М.В. Адаптивные псевдолинейные корректоры динамических характеристик систем автоматического регулирования // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309. – № 7. – С. 172–176.
2. Скороспешкин М.В., Цапко Г.П., Скороспешкин В.Н. Адаптивная система регулирования температуры кожухотрубного теплообменника // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 316. – № 5. – С. 151–156.
3. Скороспешкин М.В. Адаптивное двухканальное корректирующее устройство для систем автоматического регулирования // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 312. – № 5. – С. 52–57.
4. Топчиев Ю.И. Нелинейные корректирующие устройства в системах автоматического управления. – М.: Машиностроение, 1971. – 466 с.

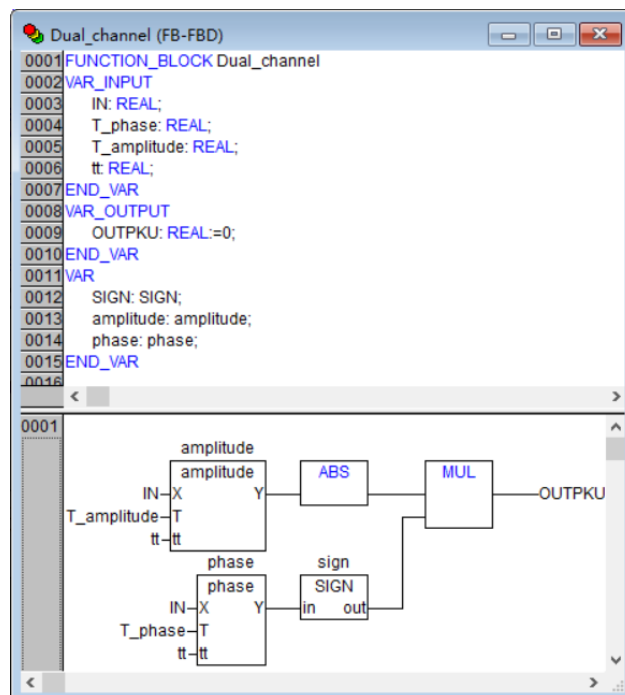


Рис. 9. Реализация псевдолинейного корректирующего устройства с отдельными каналами для амплитуды и фазы на языке FBD

Fig. 9. Implementation of the pseudolinear corrective device with separate channels for amplitude and phase in Function Block Diagram (FBD) language

Заключение

В рамках этой работы рассмотрена реализация псевдолинейного корректирующего устройства с отдельными каналами для амплитуды и фазы в промышленных системах управления. Программная реализация данного устройства на платформе CoDeSys 2.3 показала, что оно может быть легко интегрировано в существующие системы управления. Использование как стандартных, так и пользовательских функциональных блоков на языках FBD и ST обеспечивает гибкость и простоту в настройке и эксплуатации.

Этот подход к управлению нестационарными объектами имеет большой потенциал в промышленности, и его дальнейшее исследование и развитие могут привести к созданию более эффективных и устойчивых систем управления.

5. Скороспешкин М.В., Скороспешкин В.Н. Адаптивная система автоматического регулирования с подстройкой корректирующего устройства // Проблемы информатики. – 2012. – № 5. – С. 166–171.
6. Скороспешкин В.Н., Скороспешкин М.В. Нечеткий адаптивный корректор динамических свойств систем автоматического регулирования // Международный научно-исследовательский журнал. – 2014. – № 4-2 (23). – С. 64–66.

Информация об авторах

Чжэньбэй Ли, магистрант Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. chzhenbey1@tpu.ru; <https://orcid.org/0009-0002-5998-4123>

Максим Владимирович Скороспешкин, кандидат технических наук, доцент отделения автоматизации и робототехники Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. smax@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0639-6945>

Поступила в редакцию: 07.11.2023

Поступила после рецензирования: 25.12.2023

Принята к публикации: 30.12.2023

REFERENCES

1. Skorospeshkin M.V. Adaptive pseudolinear correctors of dynamic characteristics of automatic control systems. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2006, vol. 309, no. 7, pp. 172–176. (In Russ.)
2. Skorospeshkin M.V., Tsapko G.P., Skorospeshkin V.N. Adaptive temperature control system for a shell-and-tube heat exchanger. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2010, vol. 316, no. 5, pp. 151–156. (In Russ.)
3. Skorospeshkin M.V. Adaptive two-channel correction device for automatic control systems. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2008, vol. 312, no. 5, pp. 52–57. (In Russ.)
4. Topcheev Yu.I. *Nonlinear correcting devices in automatic control systems*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1971. 466 p. (In Russ.)
5. Skorospeshkin M.V., Skorospeshkin V.N. Adaptive automatic control system with adjustment of the correcting device. *Problems of informatics*, 2012, no. 5, pp. 166–171. (In Russ.)
6. Skorospeshkin V.N., Skorospeshkin M.V. Fuzzy adaptive corrector of dynamic properties of automatic control systems. *International scientific research journal*, 2014, no. 4-2 (23), pp. 64–66. (In Russ.)

Information about the authors

Zhenbei Li, Master's Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. chzhenbey1@tpu.ru; <https://orcid.org/0009-0002-5998-4123>

Maksim V. Skorospeshkin, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. smax@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0639-6945>

Received: 07.11.2023

Revised: 25.12.2023

Accepted: 30.12.2023